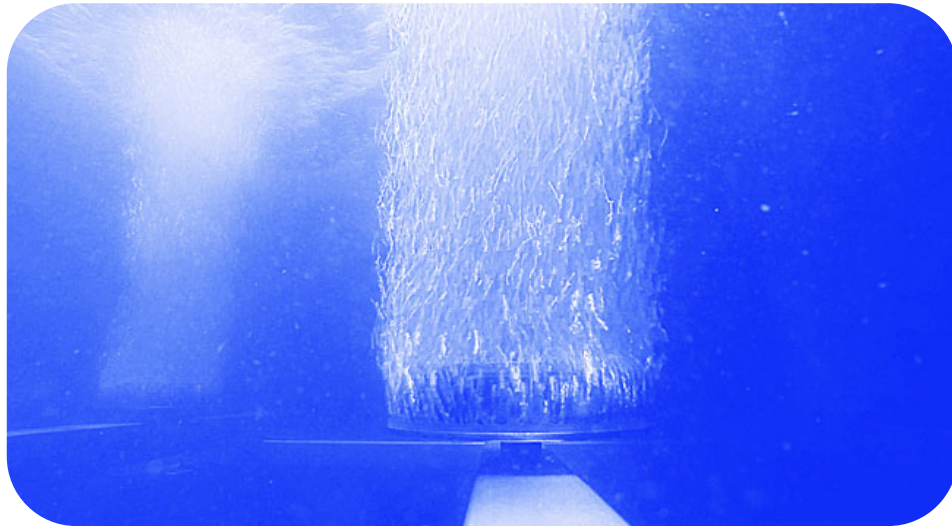


VERIFICATIONS RELATIVES A L'ADEQUATION DU PROCESSUS D'OZONATION

RECOMMANDATION



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.

Impressum

Rédaction P. Wunderlin (VSA)

Suivi technique Ch. Abegglen (VSA), E. Durisch-Kaiser (AWEL), Ch. Götz (Envilab), A. Joss (EAWAG), C. Kienle (Centre Ecotox), M. Langer (Centre Ecotox), A. Peter (WVZ), S. Santiago (Soluvial), F. Soltermann (EAWAG, désormais OFEV), U. von Gunten (EAWAG), M. Weil (ECT), S. Zimmermann-Steffens (OFEV)

La présente publication a été réalisée avec la plus grande diligence et au plus près des connaissances actuelles. Aucune garantie ne peut néanmoins être donnée concernant le caractère exact, exhaustif et actuel des informations fournies. Le VSA décline toute responsabilité à l'égard des dommages matériels ou immatériels consécutifs à l'utilisation de la présente publication.

Photo de couverture: ARA Neugut, www.neugut.ch

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.

Sommaire

1. Contexte	5
2. Conditions cadres légales	5
3. Contexte: sous-produits d'oxydation	5
4. Acteurs impliqués: qui fait quoi et qui paie?	7
5. Coûts et temps d'exécution	9
6. Marche à suivre et aspects à contrôler	9
6.1. Remarques générales concernant l'interprétation des analyses	9
6.2. Bref descriptif des analyses	10
6.3. Etude du bassin versant	11
6.4. Mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée	13
6.5. Analyses en laboratoire	16
6.6. Bioessais	19
7. Représentativité de l'échantillon et fréquence de l'exécution	21
8. Évaluation finale	21
9. Analyses complémentaires	22
10. Surveillance de la composition des eaux usées pour les STEP avec ozonation	23
11. Collecte centralisée et stockage des données	24
12. Renseignement en cas de questions et de doutes	24
13. Annexe	25
14. Bibliographie	26

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.

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

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)

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:

- **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 de tolérance s'élève à 10 µg/l (DFI, 2015). 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.**

- **Nitrosamine:** 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. 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.** 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 efficiente 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 aval subséquente doit être au moins au niveau du traitement aval ou inférieure; une augmentation de la toxicité est indésirable.

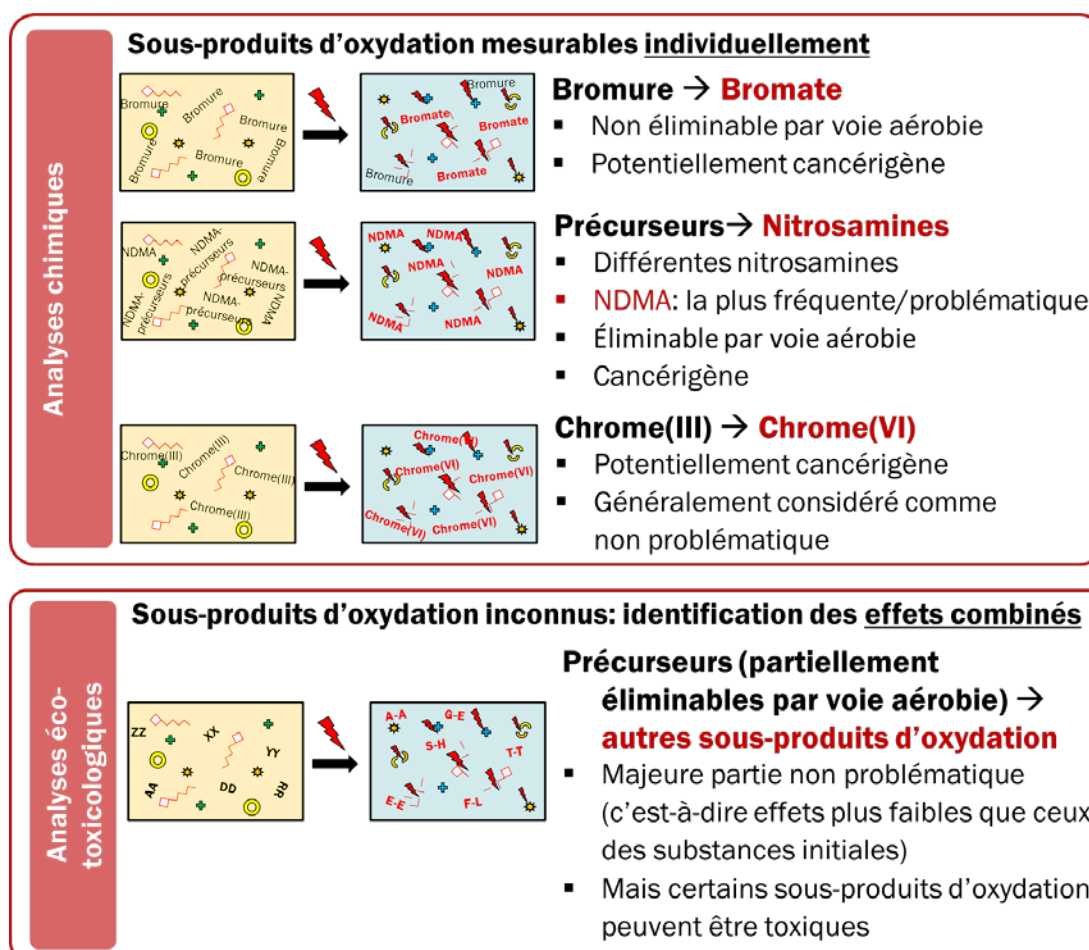


Figure 1. Répartition des sous-produits d'oxydation problématiques en substances connues et analytiquement mesurables (en haut) et en substances inconnues uniquement détectables par le biais des effets (éco)toxicologiques combinés (en bas). NDMA: N-nitrosodiméthylamine, principal représentant des nitrosamines.

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.

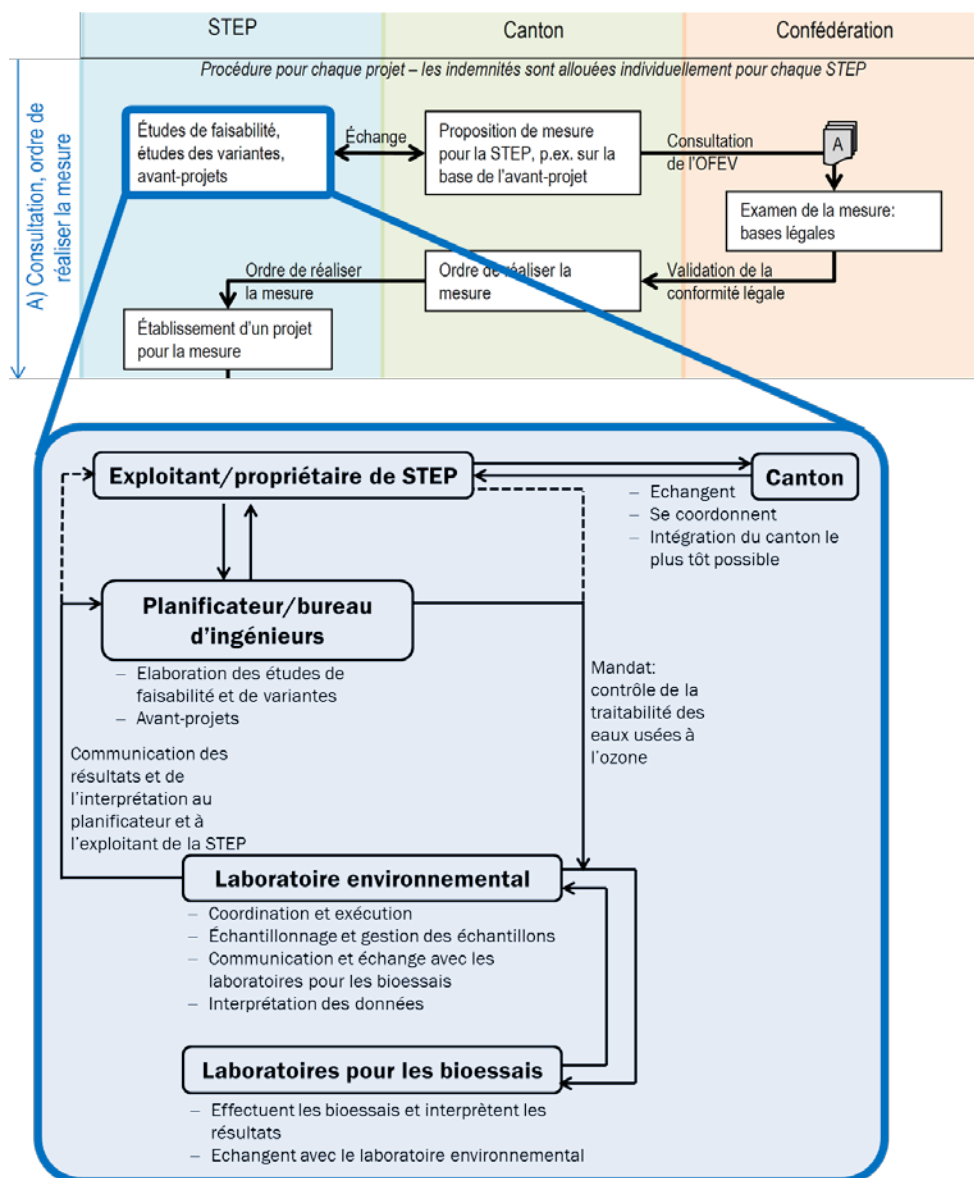


Figure 2. Aperçu des acteurs impliqués et de leurs tâches (source: Aide à l'exécution «Financement des mesures», voir Dominguez et al., 2016, adapté).

La figure 2 représente sous forme schématique les acteurs à impliquer dans les vérifications et à quel moment. Les études relatives au bassin versant (étape 1 selon fig. 3) 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. Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer une étude complète. 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, particulièrement 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 ne sont pas évalués sur la base des exigences sus-mentionnées, mais selon le principe de la garantie d'une protection efficace des cours d'eau** (= minimisation de la formation de substances indésirables). 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.

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 (surtout la NDMA: *N*-nitrosodiméthylamine) doivent être mesurées. Certaines mesures de chrome sont recommandées.
- (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 NDMA) 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.

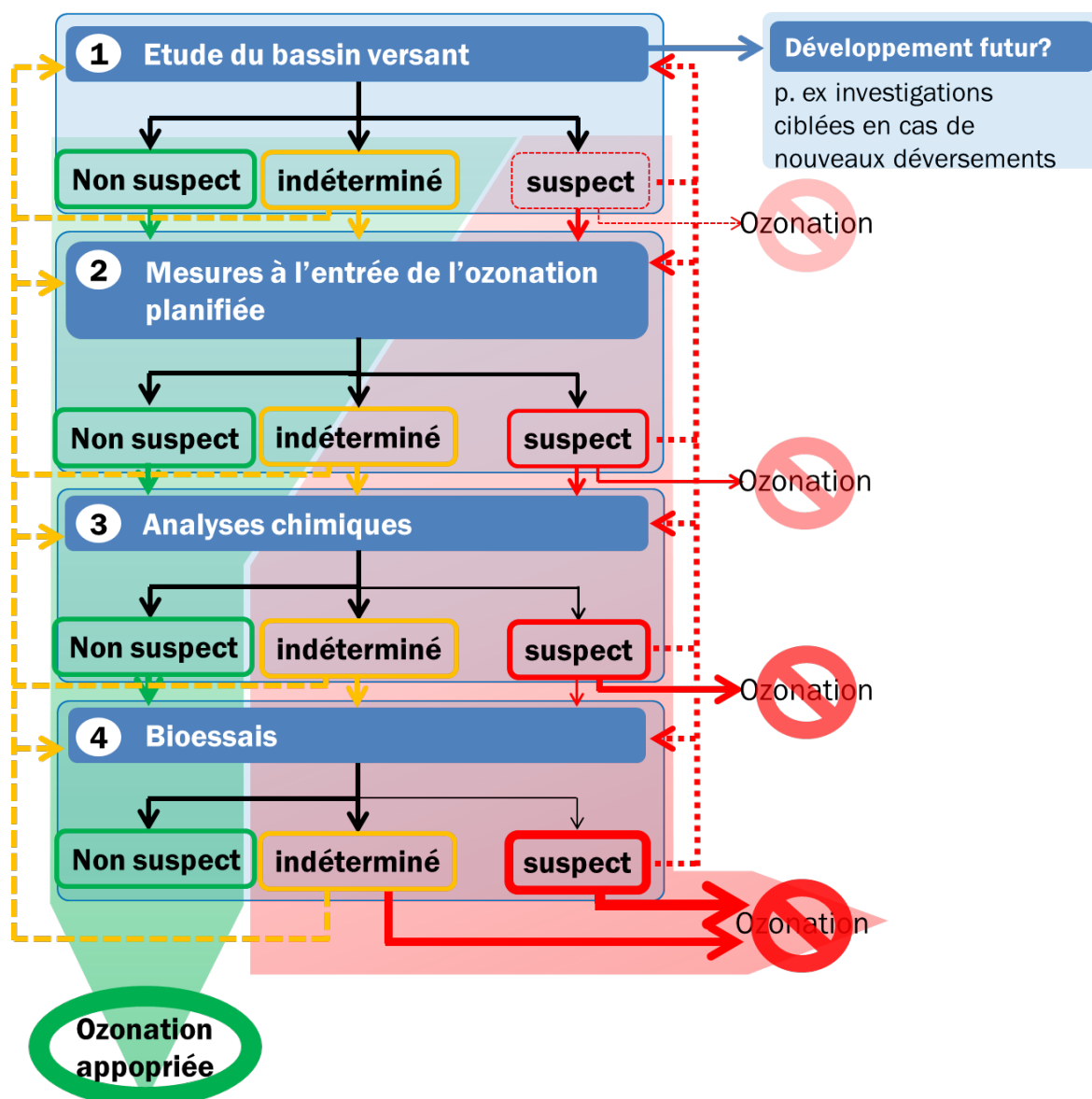


Figure 3. Représentation schématique du déroulement progressif des vérifications. Les traits pointillés (en jaune et rouge) indiquent que certaines vérifications devraient être répétées en cas de résultats indéterminés/suspects, par exemple après la mise en œuvre de mesures ciblées à la source.

6.3. 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).

Les secteurs d'activités suivants sont considérés comme de potentiels producteurs de bromure (voir fig. 5 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.

Il existe une multitude de précurseurs de nitrosamines largement inconnus. Il est probable que ces précurseurs sont fréquemment déjà transformés en nitrosamines par les processus 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.

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).

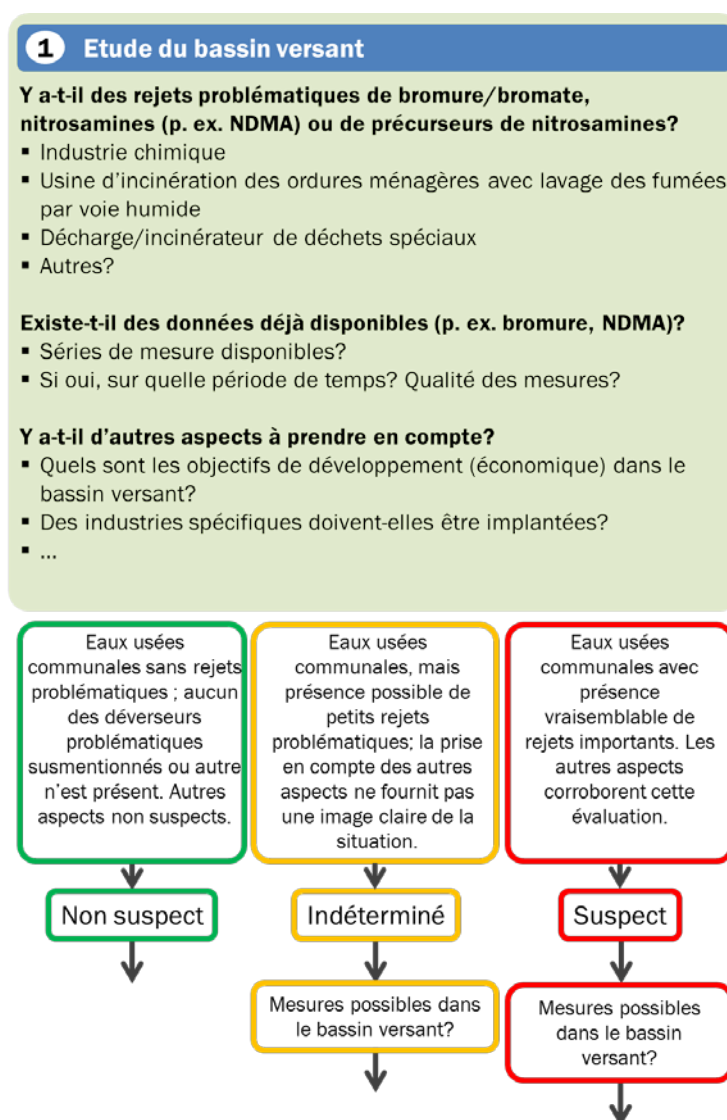


Figure 4. Aspects importants pour l'étude du bassin versant, et première évaluation grossière des eaux usées.

6.4. Mesures à l'entrée de l'ozonation planifiée

Cette étape 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 (NDMA) 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, proportionnellement au débit) prélevés sur une longue période de temps (3 à 6 mois). Dans la mesure où la formation de chromate est généralement non problématique, quelques mesures de chrome peuvent déjà être suffisantes. 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, NO₂, 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 l'étude 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 µg/l dans les bassins versants principalement communaux (c'est-à-dire sans déversements problématiques). Pour ce type d'eaux usées, la formation de bromate attendue à des doses d'ozone spécifiques traditionnelles de 0.5 à 0.7 mg O₃/mg COD se situe dans l'ordre de grandeur du µg/L. Dans les bassins versants communaux comptant peu de déversements, des concentrations de bromure allant de 100 à 400 µg/l ont été constatées, tandis qu'elles peuvent largement dépasser 400 µg/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 µg/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 µg/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). Il faut plutôt privilégier un procédé alternatif (p. ex. procédé basé sur le charbon actif).

- **Nitrosamine:** la formation de nitrosamines pendant l'ozonation n'est pas encore suffisamment comprise. Par ailleurs, la plupart des précurseurs demeurent encore mal connus. Les concentrations de nitrosamines à l'entrée de STEP suisses ont été analysées dans l'étude de Krauss et al. (2009). Les auteurs ont conclu que les concentrations de NDMA (N-nitrosodiméthylamine) sont inférieures à 5 ng/l dans les eaux usées principalement communales. Pour ce qui est du NMOR (N-nitrosomorpholine), identifié dans l'étude comme étant la deuxième nitrosamine la plus importante après la NDMA en Suisse, les concentrations étaient inférieures à 1 ng/l dans les eaux usées communales. Selon les auteurs, des concentrations plus élevées indiquent la présence de rejets industriels. Par ailleurs, les concentrations à l'entrée étaient fortement variables dans les cas de déversements industriels. Mais 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 (notamment de NDMA) par ozonation doit être réduite au minimum. Des concentrations élevées de NDMA 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 NDMA à l'entrée de l'ozonation et le potentiel de formation de NDMA lors de l'ozonation. Dans les deux cas, des mesures ciblées à la source devraient être étudiées.

2 Mesures à l'entrée de l'ozonation (c'est à dire à la sortie du décanteur secondaire)

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

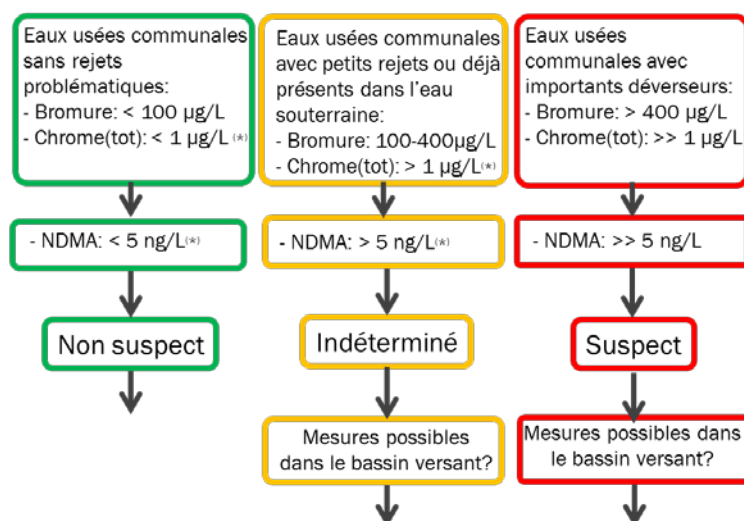
- Bromure / bromate
- Nitrosamines (NDMA, NMOR), corrélation avec des précurseurs
- Chrome / chromate

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 (pour le chrome, quelques mesures suffisent).
- Idéalement combinés avec les analyses issues de l'étape (3) «Analyses en laboratoire»: étudier la formation de bromate, NDMA
- Conforme aux conclusions tirées de l'étape (1) «Etude du bassin versant»?



(*) ou selon la limite de détection de la méthode analytique courante

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.

- **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. Mais pour pouvoir exclure une

formation de chromate de manière spécifique à chaque cas, différentes mesures de chrome(tot) et de chrome(VI) doivent impérativement être effectuées à l'entrée de l'ozonation planifiée. 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 und von Gunten, en prép.). 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. 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. Les mesures réalisées à l'entrée de l'ozonation planifiée peuvent ainsi être confirmées.

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). Mais il peut, par exemple, arriver que des charges organiques excessives régulières apparaissent à l'entrée de l'ozonation planifiée: pour un âge des boues entre 1 et 20 jours, les concentrations de COD en sortie sont comprises entre 5 et 10 mg COD/l. 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 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.

6.5. Analyses en laboratoire

Lors de cette étape, 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 traitabilité 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» - 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 normales et extrêmes. 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. 6). Pour obtenir une description détaillée des analyses ainsi que des données relatives aux plages de référence, voir Wunderlin et al. (2015) ou Schindler Wildhaber et al. (2015).

(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. Lorsque les eaux usées ne sont pas problématiques, la durée d'exposition à l'ozone se situe dans la plage des données de référence, tandis que des écarts (vers le haut et le bas) révèlent des eaux usées probablement suspectes.

(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 0.5, 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. Lorsque les eaux usées ne sont pas problématiques, la durée d'exposition aux radicaux OH se situe dans la plage des données de référence, tandis que des écarts (vers le haut et le bas) révèlent des eaux usées probablement suspectes.

(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 0.5, 1.0 et 1.5 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 modules (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).

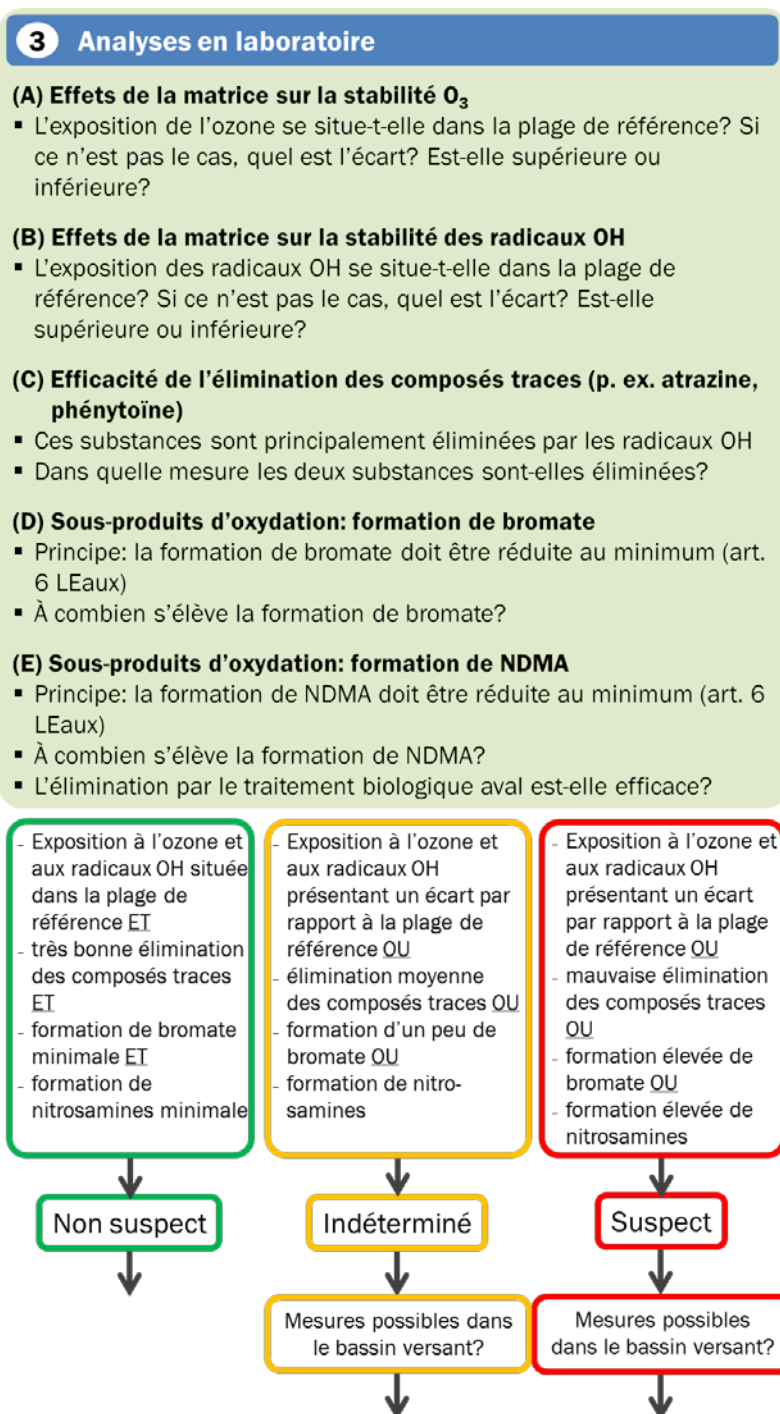


Figure 6. Aspects à étudier dans le cadre des analyses réalisées en laboratoire et critères à prendre en compte pour l'évaluation des eaux usées étudiées. Pour les données relatives aux plages de référence, voir Wunderlin et al. (2015) ou Schindler Wildhaber et al. (2015).

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

La formation de bromate est déterminée avec des doses d'ozone spécifiques de 0,5, 1,0 et 1,5 mg O₃/mg COD. La détermination des concentrations de bromure à l'entrée (voir le chapitre «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).

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

Comme pour la formation de bromate, la formation de nitrosamines par ozonation est déterminée avec des doses d'ozone spécifiques de 0.5, 1.0 et 1.5 mg O₃/mg COD. Dans la mesure où les nitrosamines peuvent être de nouveau partiellement éliminées en conditions aérobies, la concentration de nitrosamines est mesurée après l'ozonation et après le traitement biologique aval. Pour la réalisation d'une ozonation à l'échelle industrielle, la formation de nitrosamines doit être réduite au minimum (art. 6 LEaux). Si des nitrosamines sont formées par ozonation, il est important qu'elles soient de nouveau éliminées de manière significative lors du post-traitement biologique.

6.6. Bioessais

Dans cette étape, 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.

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

Bioessai	Organisme test	Effets détectables
Test de Ames	Bactéries (salmonelles)	Modification héréditaire du matériel génétique (mutagénicité)
Test de reproduction chronique des puces d'eau	Puces d'eau	Inhibition de la reproduction, taux de survie plus faible
Test combiné des algues	Algues vertes	Inhibition de la photosynthèse (notamment sous l'effet de certains herbicides) et inhibition de la croissance
Test des œufs de poissons	Poisson zèbre	Augmentation de la mortalité
Test UmuC	Bactéries (salmonelles)	Détérioration du génome (génétoxicité)
Test d'inhibition de la luminescence	Bactéries luminescentes	Inhibition de la bioluminescence

Les trois tests suivants sont recommandés au minimum pour ces analyses (voir tabl. 1 surligné en gris, et fig. 7): (i) test de Ames (avec les lignes de cellule TA98 et TA100 avec et sans activation S9), (ii) test de reproduction des puces d'eau avec *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 des œufs 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.

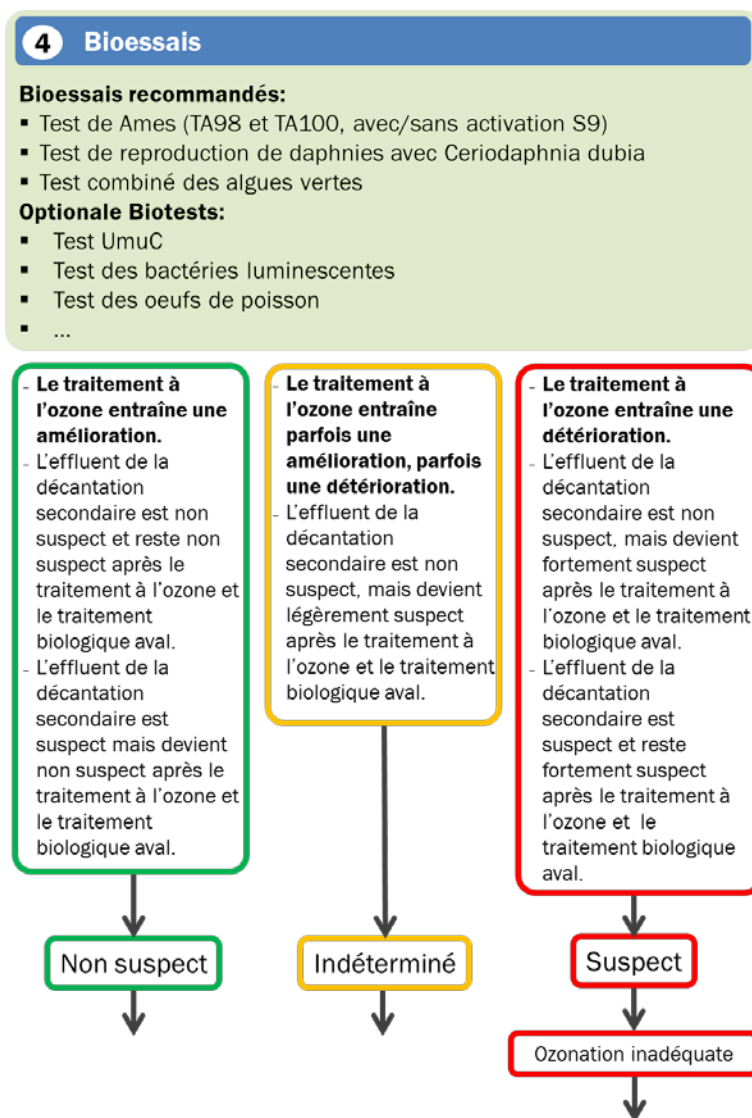


Figure 7. Bioessais recommandés et optionnels (pour des informations plus détaillées sur ces bioessais, voir également le tableau 1). Pour l'interprétation des résultats, il s'agit en premier lieu d'étudier dans quelle mesure le traitement influe sur la toxicité. Non suspect: la toxicité est nettement 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.

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. 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.

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» sont recommandées sur une période de 3 à 6 mois (échantillons composites de 5 jours), car par exemple les concentrations de bromure peuvent être très variables. Dans la mesure où la formation de chromate est généralement non problématique, quelques mesures de chrome peuvent déjà être suffisantes. 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. Les analyses peuvent 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. 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 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 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 oeuvre 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 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.

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. 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). Pour rappel: les conditions de fonctionnement extrêmes ont déjà été étudiées avec des doses d'ozone spécifiques de 0.5, 1.0 et 1.5 mg O₃/mg COD dans le cadre des vérifications préliminaires.

- **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 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. Un document est actuellement rédigé à ce sujet par la plateforme VSA «Techniques de traitement des micropolluants».

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

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 bromure.	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 bromure.	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. 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.
- DFI (2015): Département fédéral de l'intérieur DFI Ordonnance du DFI sur les substances étrangères et les composants dans les denrées alimentaires du 26 juin 1995 (version du 1^{er} octobre 2015). 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).
- 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.
- Katsoyiannis, I.A., von Gunten, U. (in prep.). Fate of Cr(III) during ozonation of secondary municipal wastewater effluent: Kinetic and mechanistic aspects.
- 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., 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.
- Centre écotox (2015). Environmental Quality Standard (EQS) - Proposition du centre écotox pour le bromate. http://www.oekotoxzentrum.ch/media/90565/bromat_dossier_final.pdf

- 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.
- 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.
- Wunderlin, P., Mestankova, H., Salhi, E., Schindler-Wildhaber, Y., Schärer, M., Schirmer, 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.
- 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.