

Guide "Énergie dans les STEP" Élimination des micropolluants

Chapitre "Efficacité énergétique des installations de traitement des MP"



Avec le soutien de

Winterthour, 17.01.2018

Donneur d'ordre:

InfraWatt
Ernst A. Müller
Kirchhofplatz 12
8200 Schaffhausen
www.infrawatt.ch, e-mail: info@infrawatt.ch

Auteurs:

Hunziker Betatech AG
Andreas Büeler, Ruedi Moser
Pflanzschulstrasse 17
8400 Winterthour
Tél. 052 234 50 50, e-mail: info@hunziker-betatech.ch

Plateforme VSA "Techniques de traitement des micropolluants"
Pascal Wunderlin
Überlandstrasse 133
8600 Dübendorf
Tél. 058 765 50 37, e-mail: info@micropoll.ch

Ryser Ingenieure AG
Andreas Hurni, Beat Kobel
Engestrasse 9
3012 Berne

Avec le soutien de:

SuisseEnergie
Office fédéral de l'énergie OFEN
3003 Berne
www.suisseenergie.ch
www.bfe.admin.ch

SuisseEnergie:	Monsieur Christoph Blaser
Responsable de projet OFEN:	Responsable du service Formation et perfectionnement
Numéro de contrat OFEN:	Madame Denise Wiedmaier
	SI/402254-01

Seuls les auteurs sont responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Sommaire

1	Introduction	3
2	Procédés d'élimination des micropolluants	4
2.1	Vue d'ensemble	4
2.2	Ozonation	5
2.3	Procédé au charbon actif en poudre (CAP)	6
2.4	Procédé au charbon actif en grains (CAG)	7
2.5	Combinaisons de procédés	7
3	Consommation d'énergie dans les installations MP	8
3.1	Consommation d'énergie des installations d'ozonation	10
3.2	Consommation d'énergie des procédés CAP	11
3.3	Consommation d'énergie des procédés CAG	11
3.4	Consommation d'énergie des combinaisons de procédés	12
4	Efficacité énergétique lors de la planification / conception du projet	13
5	Efficacité énergétique dans l'exploitation	15
6	Liste de contrôle pour la planification et l'exploitation	17
7	Perspectives	18
8	Références	19

1 Introduction

La nouvelle législation sur les composés traces organiques est entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2016 (loi sur la protection des eaux et ordonnance sur la protection des eaux). Les composés traces organiques, également appelés micropolluants (MP), sont des substances présentes en faible quantité (ng/l à µg/l) dans l'eau, qui peuvent avoir des effets négatifs sur certains organismes. Ils peuvent être d'origine naturelle (p. ex. hormones) ou issus d'une fabrication synthétique (p. ex. principes actifs médicamenteux, médicaments, produits phytosanitaires, additifs alimentaires, composants de produits de nettoyage, cosmétiques ou produits de protection, etc.).

Les micropolluants sont introduits dans les cours d'eau de différentes manières, et plus particulièrement via les effluents des stations d'épuration communales. S'ils sont partiellement éliminés par le traitement biologique des stations d'épuration des eaux usées (STEP), le rendement d'élimination des procédés biologiques est globalement insuffisant. Une étape de traitement supplémentaire plus poussée doit permettre de diminuer l'apport de micropolluants provenant des STEP dans les cours d'eau. La nouvelle ordonnance sur la protection des eaux répertorie les critères qui obligent certaines STEP suisses à se doter de cette étape de traitement supplémentaire. En résumé, les plus grandes STEP, les STEP de grande taille situées dans le bassin versant de lacs ainsi que les STEP qui déversent leur effluent dans les cours d'eau pollués devront construire une étape MP.

La révision de la loi sur la protection des eaux a permis de créer un financement spécial au niveau national, qui sera alimenté par une nouvelle taxe sur les eaux usées. Le montant de la taxe par STEP est calculé sur la base du nombre d'habitants raccordés. Il est de 9 CHF maximum par habitant et par an. Grâce à ce financement, la Confédération alloue des indemnités de 75% pour la construction et l'acquisition d'installations et d'équipements permettant d'éliminer les MP dans les STEP. Les indemnités sont accordées si la mise en œuvre de la construction débute au plus tard en 2035.

Les procédés utilisés pour l'élimination des MP vont entraîner une hausse considérable des dépenses énergétiques dues à l'exploitation des stations d'épuration. Selon les prévisions, **la consommation d'énergie augmentera de 5 à 30%** (sans filtre). Mais la consommation d'énergie supplémentaire pourra être encore plus élevée selon la taille de l'installation, la qualité des eaux usées et le procédé choisi. Globalement, on s'attend à ce que la nouvelle étape de traitement génère une consommation d'électricité supplémentaire d'un huitième dans les STEP en Suisse [11]. Il est donc d'autant plus important d'améliorer l'efficacité énergétique des installations MP en mettant systématiquement en œuvre des mesures d'optimisation énergétique durant la planification et de l'exploitation.

Les stations d'épuration à équiper doivent atteindre un taux d'élimination des MP de 80% par rapport aux eaux usées brutes. Le rendement d'épuration est contrôlé à l'aide de douze substances indicatrices définies dans l'ordonnance 814.201.231 du DETEC. Pour ce faire, seuls des composés traces organiques, généralement présents dans les eaux usées épurées biologiquement, sont mesurés. Parmi les procédés pouvant être utilisés pour l'élimination des MP, l'adsorption sur charbon actif ou l'oxydation par ozonation figurent au premier plan. Grâce à ces procédés, un large spectre de substances est éliminé des eaux usées et la qualité de l'eau est améliorée de manière significative. En principe, ces deux procédés permettent d'atteindre le taux d'épuration prescrit par la loi. Il convient toutefois de vérifier au cas par cas lequel de ces deux procédés est le plus approprié.

Les procédés usuels d'élimination des MP et leurs besoins en énergie sont décrits ci-après. Nous présenterons, sur la base de ces informations, des mesures permettant d'économiser de l'énergie au niveau de la planification et de l'exploitation d'une étape MP.

Le chapitre "Efficacité énergétique dans les installations MP" présenté ici prend en considération l'étape MP qui manquait jusque-là dans le guide "Énergie dans les STEP" [1]. Ce guide aide les exploitants de stations d'épuration et les planificateurs à diminuer de manière générale et à optimiser de façon systématique la consommation d'énergie des stations d'épuration. L'objectif de ce chapitre complémentaire est de rendre accessible aux exploitants et aux planificateurs des instruments de travail qui ont fait leurs preuves dans la pratique et de les informer concernant les dernières évolutions permettant une optimisation systématique de l'énergie. Ces informations sont spécifiquement liées à l'étape MP.

2 Procédés d'élimination des micropolluants

2.1 Vue d'ensemble

Les procédés appropriés à l'élimination des MP des eaux usées communales doivent présenter une efficacité à large spectre. Cela signifie que le procédé doit éliminer le plus grand nombre de composés traces problématiques. Par ailleurs, les procédés doivent être techniquement réalisables et économiquement viables. Selon l'état actuel de la technique, les procédés d'oxydation (ozonation) et d'adsorption (sur charbon actif) satisfont ces exigences. Les différents procédés nécessitent la mise à disposition d'agents d'épuration, d'un réacteur de contact et, en règle générale, d'un traitement complémentaire.

L'ozonation peut être réalisée sous forme de procédé indépendant ou en combinaison avec un traitement au charbon actif en aval. Le charbon actif peut être utilisé selon différentes variantes. Tous les procédés ont des avantages et des inconvénients spécifiques, cela signifie qu'aucun procédé ne peut être privilégié de façon systématique. Un aperçu des différents procédés est disponible dans le Tableau 1. Une description détaillée des principaux procédés selon l'état actuel de la technique (2017) est disponible dans les chapitres suivants.

Tableau 1: Principaux procédés permettant d'éliminer les micropolluants selon l'état de la technique (aperçu)

Principe de fonctionnement	Nom du procédé	Agent d'épuration MP	Étape de réaction MP (étape principale)	Traitement MP ultérieur	Particularités / cas d'application pertinents
Oxydation à l'ozone (O₃)	Ozonation	- Oxygène liquide (LOX) ou air comprimé (pour installation VPSA, PSA ou à air)	- Réacteur d'ozonation	Post-traitement biologique: - Filtre à sable - (Lit fluidisé)	- Convient aux eaux usées exclusivement communales - Vérification impérative de l'adéquation du processus [4]
Adsorption sur le charbon actif en poudre (CAP)	CAP avec sédimentation et filtration ("procédé Ulm")	- CAP, - Précipitants, - Adjuvants de floculation (AF)	- Réacteur de contact CAP - Étape de sédimentation	Filtre de sécurité: - Filtre à sable - Filtre sur toile	- Réintroduction du CAP dans le bassin à boues activées à vérifier / recommandée - Besoin d'espace important
	CAP avec décanteur lamellaire et filtration (procédé compact)	- CAP - Précipitant - AF - Microsable	- Réacteur de contact CAP - Sédimentation (décanteur lamellaire)	Filtre de sécurité: - Filtre sur toile - Filtre à sable	- Éventuellement réintroduction du CAP dans le bassin à boues activées - Divers procédés brevetés disponibles
	Dosage de CAP avant le filtre à sable	- CAP - Précipitant - (évent. AF)	- Réacteur de floculation (et filtre à sable)	Séparation du CAP par: - Filtre à sable	- Réintroduction du CAP dans le bassin à boues activées à vérifier / recommandée
	Dosage direct de CAP dans la biologie	- CAP - Précipitant - évent. AF	- Bassin à boues activées	Filtre de sécurité: - Filtre à sable - Filtre sur toile	- Nécessaire de procéder à un dosage plus élevé que dans le cas de procédés en aval - Intéressant en cas d'espaces réduits
	CAP avec filtration de membrane (dosage dans MBR)	- CAP	- Bassin à boues activées	Séparation du CAP par: - Membrane	- En cas d'espaces très réduits - Intéressant en cas de MBR déjà existant
Adsorption sur le charbon actif en granulés (CAG)	Charbon actif en granulés (CAG)	- CAG utilisé comme filtre à lit fixe ou - CAG fin en lit fluidisé	- Filtre CAG	Pas nécessaire (évent. filtre à lit fluidisé)	- CAG régénérable - Exploitation simple
Combinaison de procédés: Oxydation et adsorption (complémentaires)	Ozonation + CAP	- Oxygène liquide ou air comprimé - CAP - Précipitants + AF	- Réacteur d'ozonation - Réacteur de CAP (div. variantes, voir plus haut)	Étape bioactive & séparation de CAP par: - Filtre à sable	- Réintroduction du CAP dans le bassin à boues activées à vérifier / recommandée
	Ozonation + CAG	- LOX / air comprimé - CAG	- Réacteur d'ozonation - Filtre CAG	Étape bioactive: - Filtre CAG	- CAG régénérable

2.2 Ozonation

L'ozone (O_3) est un gaz réactif qui réagit avec des substances contenues dans l'eau et attaque également des composés difficilement biodégradables. Les composés traces organiques sont oxydés, c'est-à-dire qu'ils sont convertis en produits de transformation et perdent ainsi leur effet. Par ailleurs, des composés facilement biodégradables se forment et sont éliminés efficacement lors du traitement complémentaire. Selon l'état actuel de la technique, une filtration confinée biologiquement active (p. ex. filtre à sable) est le procédé de traitement complémentaire le plus approprié. L'efficacité de l'élimination des composés traces dépend de la dose d'ozone spécifique.

L'ozone ne réagit pas seulement pas avec des composés traces organiques, mais également de manière non-spécifique avec d'autres substances contenues dans les eaux usées, telles que le COD (substances organiques dissoutes) et le nitrite. La réaction de l'ozone avec d'autres substances présentes dans les eaux usées (p. ex. bromure) peut engendrer la formation de sous-produits d'oxydation problématiques, tels que le bromate ou les nitrosamines. Certaines de ces substances sont de nouveau partiellement éliminées grâce au traitement complémentaire, d'autres non (p. ex. bromate). C'est pourquoi il est important d'identifier ces eaux usées problématiques suffisamment tôt (avant de sélectionner la variante) et d'exclure tout traitement à l'ozone. Cette procédure détaillée est décrite dans la recommandation du VSA "Vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation" [4].

L'ozone est fabriqué dans un générateur d'ozone à partir d'oxygène (O_2) et d'énergie électrique. L'ozone doit être fabriqué sur site en fonction des besoins, car il s'agit d'une substance instable impossible à stocker. L'oxygène nécessaire peut être mis à disposition de différentes manières:

- sous forme d'oxygène liquide (Liquid Oxygen, LOX), livré de l'extérieur et stocké dans un réservoir;
- à l'aide de l'enrichissement en oxygène sur site via une adsorption par alternance de pression et de vide (Vacuum-Pressure Swing Adsorption, VPSA) ou par adsorption par variations de pression (Pressure Swing Adsorption, PSA);
- en utilisant de l'oxygène dans de l'air comprimé sec, exempt d'huile ou de graisse et sans enrichissement.

L'ozone gazeux est introduit dans les eaux usées à une concentration pondérale pouvant aller jusqu'à env. 12 % avec le gaz porteur (oxygène ou air). L'apport d'ozone peut être réalisé à l'aide de diffuseurs ou avec un système constitué d'une pompe et d'un injecteur. Dans le cas du système pompe/injecteur, l'ozone est habituellement injecté dans un flux partiel d'eaux usées, mélangé ensuite au flux principal. En outre, de l'énergie supplémentaire est nécessaire pour faire fonctionner la pompe. C'est pourquoi, du point de vue énergétique, il convient de privilégier un système d'injection par diffuseurs. Une station de relevage est généralement nécessaire en raison de la perte de pression dans le filtre à sable. Mais elle nécessite également de l'électricité.

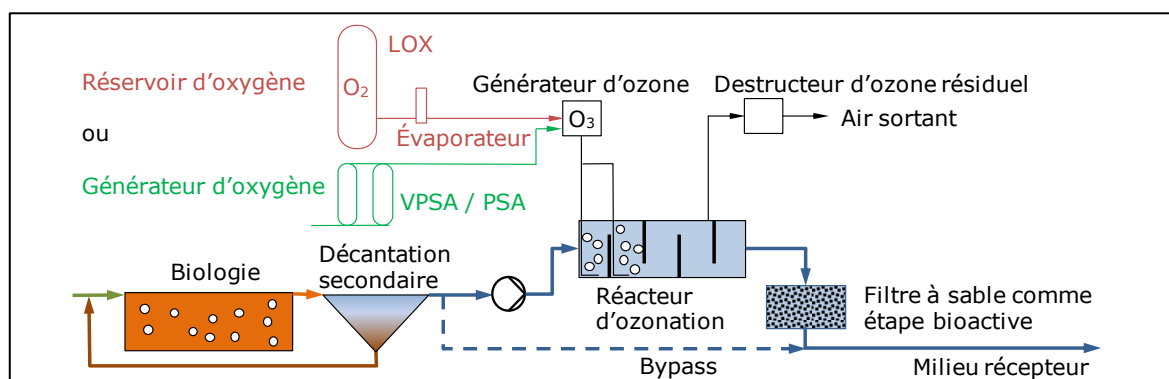


Figure 1: Diagramme de flux pour une ozonation avec filtration sur sable; mise à disposition d'oxygène sous forme de LOX ou à l'aide d'une installation VPSA

2.3 Procédé au charbon actif en poudre (CAP)

Le charbon actif peut être fabriqué à partir de différentes matières premières (houille, lignite ou tourbe), mais également à partir de ressources renouvelables (bois ou écorces de noix de coco) et utilisé sous différentes formes. L'utilisation de charbon actif en poudre (CAP) est une possibilité; il s'agit d'un produit disponible sous forme de poudre finement moulue présentant une granulométrie de quelques μm et une surface intérieure extrêmement élevée. Lors du contact des eaux usées avec le CAP, les MP s'adsorbent sur le charbon actif. Le rendement d'élimination MP du CAP est très élevé en raison de la structure poreuse ainsi que de la surface spécifique élevée du CAP. L'étape suivante (séparation du CAP des eaux usées) permet d'éliminer efficacement du système les MP adsorbés. Afin d'atteindre cet objectif et d'éviter une pollution supplémentaire de l'environnement, les pertes de CAP doivent être réduites au minimum.

Le rendement d'élimination d'un charbon spécifique dépend fortement de la matière première utilisée, du processus d'activation ainsi que de la répartition granulométrique. Le rendement d'élimination d'un procédé au charbon actif s'améliore généralement avec un dosage plus élevé ($\text{g CAP}/\text{m}^3$) et un long temps de contact, car les processus d'adsorption sont relativement lents. Le CAP peut également être réintroduit dans l'étape biologique pour mieux exploiter la capacité d'adsorption. Il est alors mélangé aux boues activées puis incinéré lors du traitement des boues.

Il convient de définir le CAP le plus approprié dans le cadre d'analyses préalables (à l'aide d'essais par agitation ou vibration), car les eaux usées ont des compositions très différentes. En outre, il faut tenir compte du fait que la matrice organique fait concurrence aux MP pour les sites de fixation libres sur le CAP. Par conséquent, plus les concentrations en COD sont élevées, plus la consommation de CAP augmente. La rentabilité du procédé est ainsi influencée respectivement détériorée de manière décisive.

Le CAP peut être utilisé de différentes manières. Le procédé "classique" (également appelé "procédé Ulm"), en aval de l'étape de traitement biologique, est composé d'un réacteur de contact, d'une sédimentation et d'une filtration. Ce procédé nécessite un espace relativement grand. La surface de la sédimentation peut être réduite à l'aide d'un décanteur lamellaire. De manière alternative, le CAP peut être directement dosé dans un réacteur de floculation et donc avant le filtre à sable, ou directement dans l'étape de traitement biologique. Pour toutes les variantes de procédés susmentionnées, il est nécessaire de séparer autant que possible intégralement le CAP des eaux usées traitées. Cela signifie que les pertes de charbon actif doivent être réduites au minimum.

Une station de relevage supplémentaire est généralement nécessaire en raison de la perte de pression dans le filtre à sable.

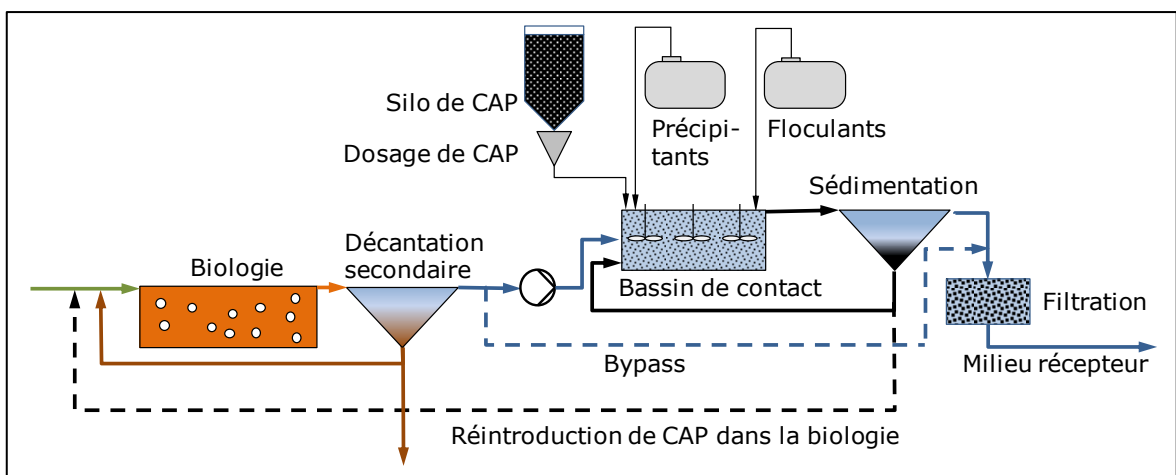


Figure 2: Diagramme d'un procédé "classique" au charbon actif en poudre avec sédimentation et filtration ("procédé Ulm") en aval du traitement biologique

2.4 Procédé au charbon actif en grains (CAG)

Contrairement au charbon actif en poudre, le charbon actif en grains (CAG) présente une granulométrie plus grossière. La dimension des grains est de l'ordre du millimètre. Dans ce cas, le mécanisme d'action est également l'adsorption. Avec le traitement au CAG, l'adsorption s'effectue sur le charbon actif en grains contenu dans un filtre confiné et parcouru par les eaux usées. Présent en concentration beaucoup plus élevée par rapport aux composés traces, le COD entre en concurrence avec ces derniers pour les sites d'adsorption libres sur le CAG, réduisant ainsi la durée de vie du charbon actif. Celui-ci doit être régulièrement remplacé et réactivé en raison de l'augmentation de la charge. Au cours de l'exploitation, un biofilm susceptible de produire un effet supplémentaire sur l'élimination des composés traces peut se former à la surface du charbon actif [7]. Les mêmes principes que pour le procédé au CAP s'appliquent au rendement d'élimination du CAG: un temps de contact suffisamment long est le paramètre d'exploitation décisif. Il subsiste encore actuellement des incertitudes sur le dimensionnement du procédé CAG (temps de contact nécessaire, durée de vie possible). Une station de relevage est généralement nécessaire pour le procédé CAG.

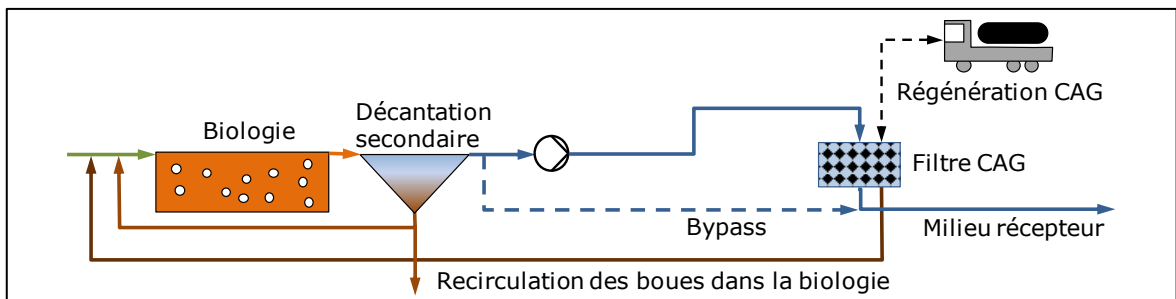


Figure 3: Diagramme d'un procédé au charbon actif en grains

2.5 Combinaisons de procédés

Les combinaisons de procédés utilisent les mécanismes complémentaires de l'oxydation (ozonation) et de l'adsorption (CAP ou CAG). Il est actuellement admis qu'une combinaison de procédés permet d'éliminer un plus grand spectre de composés traces organiques grâce à cet effet complémentaire. Il s'agit de combiner les avantages d'une ozonation (oxydation) avec les avantages des procédés au charbon actif (adsorption), sans que les inconvénients (p. ex. formation excessive de sous-produits d'oxydation, pertes de CAP, brève durée de vie) prédominent [6]. Mais aucun jugement définitif ne peut actuellement être porté sur ces aspects. Des projets sont en cours. Il convient toutefois de noter que les aspects critiques du seul traitement par ozonation ne sont pas automatiquement éliminés lors d'une combinaison de procédés. Dans le cas d'une combinaison de procédés, il faut donc également clarifier suffisamment tôt les conditions cadres importantes et les intégrer dans la planification et l'exploitation ([4]; voir également le chapitre 2.2).

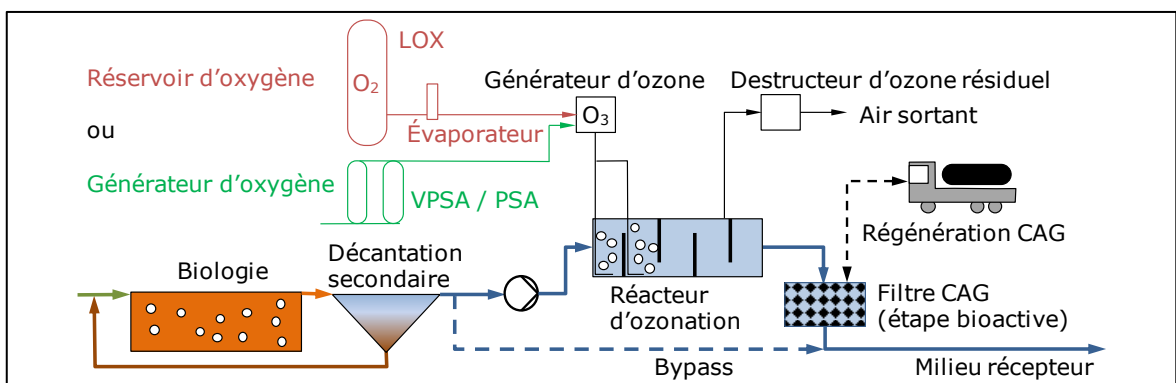


Figure 4: Diagramme d'une combinaison de procédés ozonation et charbon actif en grains

3 Consommation d'énergie dans les installations MP

Les étapes de traitement des installations MP sont des sous-systèmes de l'épuration des eaux usées. La délimitation de l'installation MP par rapport au reste de la STEP s'effectue conformément à la recommandation du VSA "Définition et standardisation des indicateurs du procédé d'élimination de composés traces organiques dans les STEP" [5]. La Figure 5 montre au sein de quelles limites les processus de l'étape MP représentant la consommation d'énergie principale doivent être placés.

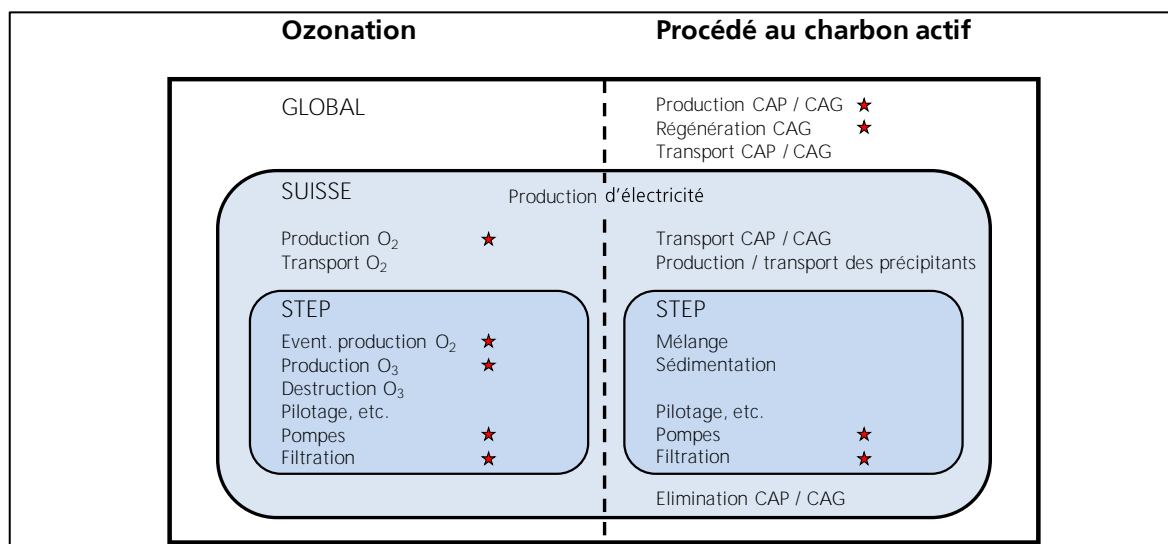


Figure 5: Limites du système et consommateurs d'énergie de l'étape MP (★: principaux consommateurs) [9, adapté]

L'ozonation tout comme l'utilisation de charbon actif nécessite de l'énergie supplémentaire, le type d'énergie étant toutefois différent. L'énergie est utilisée sous forme électrique dans le cas de l'ozonation, tandis qu'elle est consommée sous forme de charbon et de chaleur dans le cas du charbon actif. Pour pouvoir comparer les différentes formes d'énergie entre elles, la consommation d'énergie primaire est estimée à l'aide des facteurs d'énergie primaire. La consommation d'énergie primaire comprend la consommation d'énergie globale pour la fabrication, l'exploitation ainsi que pour l'élimination.

Au niveau d'une STEP individuelle, l'ozonation provoque une augmentation de la consommation de courant plus importante que dans le cas du procédé au charbon actif. Mais, si l'on tient compte de la fabrication de tous les réactifs d'exploitation, la consommation d'énergie primaire des procédés au charbon actif est un peu plus importante. Le Tableau 2 répertorie la consommation d'énergie moyenne des deux procédés pour un rendement d'épuration comparable [7], [8]. Un nombre croissant d'expériences d'exploitation permettront de corriger ces chiffres à l'avenir, si nécessaire.

Tableau 2: Consommation d'électricité et d'énergie primaire pour l'ozonation / le procédé au CAP [7]

Paramètres (sans traitement complémentaire)	Unité	Ozonation	Procédé CAP
Dose pour un rendement d'épuration comparable	[g/m ³]	5	12
Consommation de courant pour l'étape MP dans la STEP (sans production d'oxygène)			
- Par m ³ d'eaux usées	[kWh/m ³]	0.06	0.02
- Par équivalent-habitant et année	[kWh/EH/a]	8	2.5
Consommation d'énergie primaire pour l'étape MP (hypothèse: CAP frais fabriqué à partir de houille, voir chapitre 3.2, [16])			
- Par m ³ d'eaux usées	[kWh/m ³]	0.28	0.37
- Par équivalent-habitant et année	[kWh/EH/a]	34	46

Le Tableau 3 montre les impacts estimés de l'étape de traitement supplémentaire sur la consommation d'énergie de la Suisse à l'aide de trois scénarios. Dans le cas du scénario 1, toutes les STEP concernées ont été équipées d'un processus d'ozonation; dans le cas du scénario 2, elles ont été équipées d'un procédé au CAP; dans le cas du scénario 3, une moitié des STEP ont été dotées d'une ozonation et l'autre moitié d'un procédé au CAP. Hypothèses: l'oxygène est produit de manière centralisée en Suisse, le charbon actif est fabriqué à l'étranger et valorisé thermiquement avec les boues d'épuration après utilisation.

Tableau 3: Consommation d'énergie (primaire) supplémentaire pour le procédé MP dans 100 STEP en Suisse [8]

Paramètres	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Part d'ozonation (dose: 5g O ₃ /m ³)	[%]	100	0	50
Part de procédé au CAP (dose: 12g CAP/m ³)	[%]	0	100	50
Consommation d'électricité CH sans filtre	[GWh/a]	70	15	40
Consommation d'électricité CH avec filtre	[GWh/a]	90	35	60
Énergie primaire sans filtre	[GWh/a]	200	280	240
Énergie primaire avec filtre	[GWh/a]	260	340	300

Les étapes de traitement permettant d'éliminer les MP vont engendrer une consommation supplémentaire d'environ 60 GWh/a en Suisse selon le scénario 3 représenté dans le Tableau 3 [8]. Dans ce scénario, une ozonation est réalisée dans la moitié des installations prévues et une étape au charbon actif est construite dans l'autre moitié.

Selon une étude réalisée sur ordre de l'Office fédéral pour l'environnement portant sur l'efficacité énergétique et la production d'énergie dans les STEP, la consommation d'électricité actuelle de toutes les STEP suisses est estimée à environ 450 GWh/a [11]. Les 60 GWh/a supplémentaires pour les étapes MP correspondent ainsi à une consommation supplémentaire de 13% ou à un huitième de la consommation d'électricité actuelle des stations d'épuration en Suisse.

Selon la même étude, le potentiel d'économie sur le courant électrique est estimé à près de 100 GWh/a pour toutes les STEP suisses et le potentiel d'augmentation de la production d'électricité à près de 110 GWh/a. Globalement, compte-tenu du potentiel d'optimisation et de l'étape supplémentaire visant à éliminer les micropolluants, l'achat d'électricité externe de toutes les STEP suisses pourrait théoriquement être diminué de 40% [11]. L'objectif doit donc être de compenser au moins la consommation supplémentaire d'électricité pour l'étape MP par des mesures visant à optimiser l'énergie.



Figure 6: Générateur d'ozone



Figure 7: Station de dosage de CAP

3.1 Consommation d'énergie des installations d'ozonation

L'exploitation d'une ozonation requiert de l'énergie électrique supplémentaire dans la STEP, plus particulièrement pour la fabrication d'ozone dans le générateur d'ozone. Si le réactif d'exploitation est livré (oxygène liquide, LOX), la consommation d'énergie liée à la production d'oxygène n'est pas imputée à la STEP, mais au fabricant d'oxygène. Si l'oxygène est fabriqué et enrichi sur place, une quantité significative d'énergie est également consommée dans ce but. Un générateur d'ozone a une puissance de raccordement élevée. L'approvisionnement en énergie doit donc éventuellement être adaptée et/ou des transformateurs supplémentaires sont nécessaires.

Les besoins en énergie d'une ozonation sont déterminés par la composition des eaux usées (dosage nécessaire) et les conditions d'exploitation. Le dosage nécessaire dépend surtout de la charge de fond des eaux usées à traiter, notamment des concentrations en COD et en NO_2 . Pour atteindre le rendement d'épuration nécessaire de 80%, les doses d'ozone spécifiques suivantes sont généralement nécessaires:

- f_{DOC} = 0.4 à 0.8 g O_3 /g COD (spécifique aux eaux usées)
- $f_{\text{NO}_2\text{-N}}$ = 3.4 g O_3 /g $\text{NO}_2\text{-N}$ (stoechiométriquement)

En cas de charges connues, les besoins en ozone sont calculés de la manière suivante:

$$\text{Besoin } \text{O}_3 \text{ [kg/h]} = Q \text{ [m}^3\text{/h]} * (f_{\text{COD}} \text{ [g } \text{O}_3\text{/g COD]} * C_{\text{COD}} \text{ [g/m}^3\text{]} + f_{\text{NO}_2\text{-N}} \text{ [g } \text{O}_3\text{/g } \text{NO}_2\text{-N]} * C_{\text{NO}_2\text{-N}} \text{ [g/m}^3\text{]}) / 1000$$

Autres facteurs pouvant augmenter la consommation d'énergie: une station de relevage supplémentaire et l'étape biologiquement active en aval, dans la mesure où il n'y a pas de filtration.

Une ozonation augmente la consommation d'énergie de 0.03 à 0.1 kWh/m³ [17]. Les besoins énergétiques pour une filtration sur sable sont de 0.01 à 0.05 kWh/m³. Ainsi, en cas d'ozonation, la consommation d'énergie d'une STEP augmente d'environ 10 à 30% [7].

La Figure 8 montre, sur l'exemple de l'installation pilote de Regensdorf, la consommation d'énergie liée à la production d'ozone avec un flux de gaz constant (15 Nm³/h). Les courbes montrent la consommation d'électricité du générateur d'ozone seul (production O_3), la consommation totale d'électricité de l'installation d'ozone dans la STEP (O_3 STEP) et la consommation d'électricité en tenant compte de la production d'oxygène (O_2 inclus) [7]. Cela donne un aperçu de la répartition des pourcentages des principaux consommateurs d'énergie. En outre, il apparaît que la consommation spécifique en énergie peut fortement augmenter lorsque l'installation n'est pas utilisée dans la plage optimale. Notons que cette représentation n'est pas valable de manière générale, mais doit être déterminée en fonction des installations et des différents contextes.

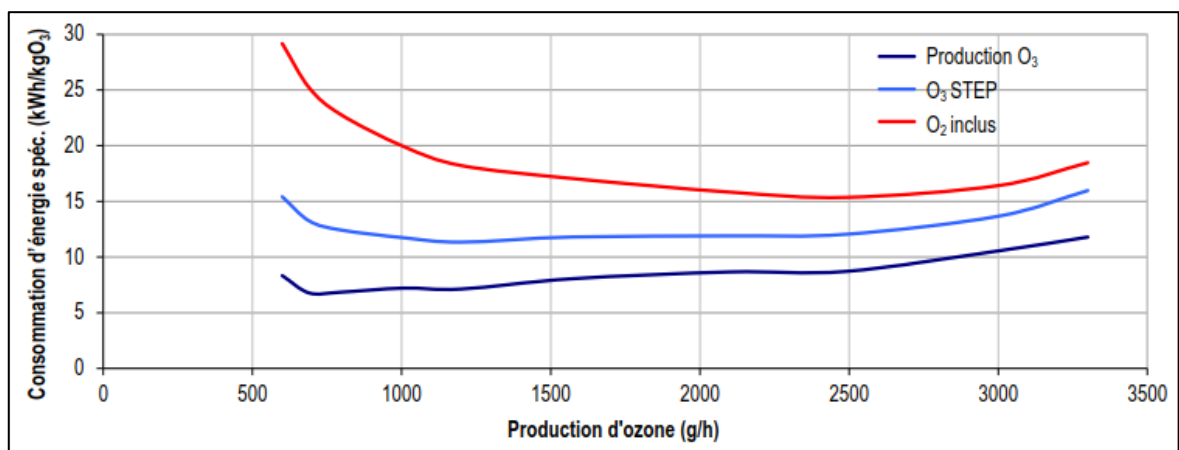


Figure 8: Consommation d'énergie spécifique (électricité) en fonction de la production d'ozone [7]

3.2 Consommation d'énergie des procédés CAP

L'utilisation de CAP entraîne une faible augmentation de la consommation d'énergie pour les STEP de 5% [7]. Les principaux consommateurs d'énergie sont les agitateurs du réacteur de contact et les pompes de recirculation. La séparation du CAP doit être considérée comme un consommateur d'énergie supplémentaire éventuellement pertinent. Si le CAP est séparé à l'aide d'une filtration sur sable, les besoins en énergie sont d'env. 0.01 à 0.05 kWh/m³. En revanche, dans le cas d'un dosage direct dans un réacteur à membrane (MBR), de l'énergie supplémentaire est requise pour la séparation de CAP uniquement si la membrane doit être lavé plus souvent en raison du dosage de CAP.

En dehors de la STEP, de l'énergie est surtout nécessaire pour la fabrication du charbon actif. La fabrication de CAP nécessite beaucoup d'énergie. Les données disponibles concernant la fabrication de charbon actif sont toujours relativement rares, mais le rapport du groupe de travail DWA KA-8.6 publié en 2016 fournit un bon aperçu du sujet [16]. Selon les informations données par les fabricants, les besoins en matières premières pour fabriquer 1 kg de charbon actif frais sont compris entre 3.5 à 5 kg de houille, 5 à 6.5 kg de lignite et 10 à 13 kg d'écorces de noix de coco, selon le matériau et la qualité du produit.

L'origine de la matière première (fossile ou renouvelable) a une grande influence sur la consommation d'énergie primaire (et donc les émissions de CO₂) du charbon actif. La part de produits réactivés est également déterminante. Un aperçu de la consommation d'énergie primaire et l'empreinte CO₂ (en équivalents CO₂) de la fabrication de charbon actif est représenté dans le Tableau 4. Il convient ici de faire la différence entre la houille, la lignite et les écorces de noix de coco, ainsi qu'entre le charbon frais et le charbon réactivé [16]:

Tableau 4: Consommation d'énergie primaire et empreinte CO₂ du charbon actif fabriqué à partir de différentes matières premières [16]

Matière première	Traitement	Consommation d'énergie primaire (fossile)		Empreinte CO ₂
		[GJ/t _{charbon actif}]	[kWh/kg _{charbon actif}]	[kg _{équ.CO2} /kg _{charbon actif}]
Houille	Charbon frais	109-124	30-35	11-18
	Charbon réactivé	17-29	5-8	2-3
Lignite	Charbon frais	152-184	42-51	14-18
	Charbon réactivé	20-37	6-10	2-4
Écorces de noix de coco	Charbon frais	28-51	8-14	5-7
	Charbon réactivé	9-14	2.5-4	1

Avec un traitement au CAP, la quantité totale de boue d'une STEP augmente d'env. 5 à 10%, et de 10 à 30% dans le cas d'un dosage direct dans l'étape biologique. Cette boue supplémentaire doit être éliminée. Idéalement, la boue de CAP est traitée dans le traitement des boues existant [7].

Des études détaillées montrent que ni l'aptitude à la déshydratation ni le pouvoir calorifique des boues ne sont modifiés significativement par le CAP. Il a par ailleurs été montré qu'aucune redissolution significative des composés traces adsorbés n'avait lieu pendant le processus de digestion [15].

3.3 Consommation d'énergie des procédés CAG

Au niveau de la STEP, les besoins en énergie pour l'exploitation d'un filtre à CAG se situent dans la même fourchette que pour une filtration sur sable (fourchette comprise entre 0.01 et 0.05 kWh/m³) [7]. Contrairement aux procédés de traitement à l'ozone ou au CAP, aucune consommation d'énergie supplémentaire liée au traitement complémentaire ou à la séparation ne doit être prise en compte, car cela fait déjà partie du procédé.

Pour un bilan global, la consommation d'énergie liée à la fabrication et la régénération du charbon actif doit être prise en compte. Lors de la fabrication, le charbon actif en grains ne se distingue du charbon actif en poudre que par l'étape (manquante) du broyage. Les mêmes facteurs d'énergie primaire que pour le CAP peuvent donc être utilisés pour le CAG selon le Tableau 4.

Contrairement au CAP, le CAG peut être régénéré (avec pertes), ce qui requiert beaucoup moins d'énergie que la fabrication de charbon actif frais. Les consommations d'énergie primaire des produits réactivés sont indiquées dans le Tableau 4. Lors de la régénération ou de la réactivation, seules les pertes de charbon (conséquence de la régénération) doivent être remplacées par du charbon actif frais. Selon les données des fabricants, les pertes subies lors de la réactivation atteignent, selon la matière première, 5 à 13% pour le charbon actif fabriqué avec de la houille, 5 à 20% pour le charbon actif fabriqué avec de la lignite et 3 à 15% pour le charbon actif fabriqué avec des écorces de noix de coco. Le charbon actif régénéré se caractérise par une consommation d'énergie primaire environ 5 fois plus faible que celle du charbon frais. Mais la réactivation n'est pas pertinente dans tous les cas. Ainsi, un niveau minimum de dureté de grain, de taille et un nombre minimum de sites d'adsorption libres sont des conditions indispensables [16].

La durée de vie du charbon actif en grains est décisive pour la consommation d'énergie. La durée de vie des filtre à CAG est exprimée en volumes de lit traités (BVT - Bed Volume Treated). Des durées de vie suffisamment longues du CAG doivent être atteintes afin de présenter un bilan énergétique et économique comparable ou meilleur que celui du traitement au CAP. Les premiers résultats relatifs aux durées de vie atteignables, obtenus lors d'essais pilotes menés à la STEP de Bülach, sont très prometteurs. Avec un temps de contact suffisamment élevé (temps de contact en lit vide > 25 min), la consommation spécifique de charbon actif se situait dans la même fourchette qu'avec un procédé au CAP dans des conditions comparables.

La Figure 9 montre par exemple comment la consommation d'énergie primaire et de charbon d'un filtre à CAG dépend de la durée de vie du filtre (exprimée en BVT) [7]. Notons que cette représentation n'est pas absolue, mais qu'elle dépend des conditions cadres spécifiques aux installations.

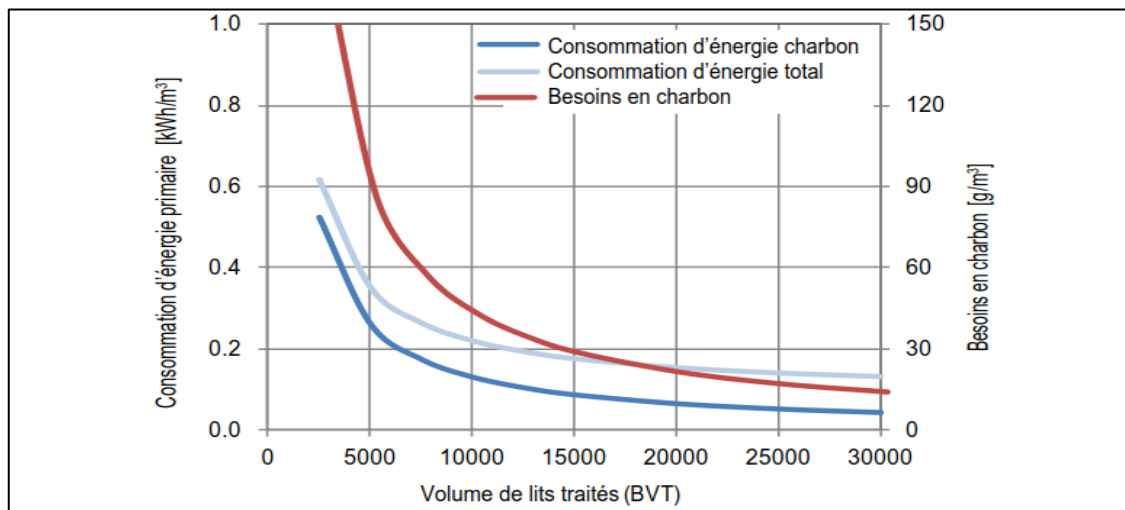


Figure 9: Consommation d'énergie primaire et besoins en charbon d'un filtre à CAG en fonction de la durée de vie du filtre [7]

3.4 Consommation d'énergie des combinaisons de procédés

Les besoins en énergie des combinaisons de procédés se composent des besoins en énergie des différents procédés et dépendent fortement des conditions cadres. Compte-tenu de l'énergie grise, les besoins en énergie peuvent être généralement plus élevés que les procédés individuels. Un procédé combiné est éventuellement choisi pour optimiser le rendement d'épuration (exploitation de principes actifs complémentaires), mais guère pour optimiser les besoins en énergie.

4 Efficacité énergétique lors de la planification / conception du projet

Utilisation de procédés énergétiquement efficaces:

Lors de l'évaluation des variantes de procédés, une analyse énergétique globale doit être effectuée. Pour ce faire, les dépenses liées à la fabrication de l'agent d'épuration (charbon actif ou oxygène) doivent être prises en compte. Les différents moyens de transport sont négligeables en comparaison. Une prise en compte des besoins d'énergie primaire ou un bilan CO₂ sont plutôt pertinents.

Il est recommandé de comparer les différentes sources d'énergie à l'aide des facteurs d'énergie primaire, par exemple avec l'outil Excel de la recommandation du VSA "Définition et standardisation des indicateurs du procédé d'élimination de composés traces organiques dans les STEP" [5]. Néanmoins, un charbon actif présentant un mauvais facteur d'énergie primaire peut obtenir de meilleurs résultats, s'il atteint le rendement d'élimination MP avec une dose plus faible (CAP) ou une durée de vie plus longue (CAG). Dans la mesure où il existe des charbons actifs très différents, le charbon actif le plus approprié à l'installation doit être déterminé suffisamment tôt. Des recherches doivent encore être menées sur le choix et le contrôle de la qualité du charbon actif.

Intégration optimale dans l'installation existante:

Le rendement d'épuration des étapes en amont dans la STEP doit être pris en compte lors de la sélection du procédé. Les besoins en énergie nécessaires à l'étape MP doivent être optimisés en priorité grâce à un prétraitement efficace. Cela signifie concrètement que les concentrations en COD, MES et nitrite (dans le cas d'une ozonation) doivent être aussi faibles que possible en sortie de la décantation secondaire ou à l'entrée de l'étape MP. Le COD est oxydé par l'ozone et adsorbé sur le charbon actif. Une concentration élevée en COD en sortie entraîne une augmentation de la consommation d'agents d'épuration. La concentration en nitrite en sortie doit également être aussi faible que possible car le nitrite est rapidement oxydé en nitrate par l'ozonation. Cela améliore la qualité des effluents, mais requiert beaucoup plus d'ozone, ce qui se répercute à nouveau sur la consommation d'énergie. Des teneurs élevées en matières en suspension impliquent un rétrolavage plus fréquent des filtres. Pour maintenir les besoins en réactifs d'exploitation à un niveau aussi faible que possible, l'étape MP doit être mise en place après un traitement biologique poussé (nitrification tout au long de l'année pour une ozonation). De manière générale, la règle suivante s'applique: plus la charge est faible à l'entrée de l'étape MP, plus l'utilisation des agents d'épuration permettant d'éliminer les MP est économique. Chaque besoin supplémentaire de réactifs d'exploitation ne réduit pas seulement la rentabilité, mais également l'efficacité énergétique.

Les pertes hydrauliques de la filtration doivent être prises en compte lors de la planification. Selon la conception de l'installation et la variante de procédé choisie, l'étape MP peut être intégrée hydrauliquement dans l'installation de telle sorte à pouvoir se passer d'une station de pompage intermédiaire. L'intégration hydraulique est un critère qui doit être évalué lors de la comparaison de procédés.

Le concept EMCRCG doit être planifié de sorte que, plus tard, les données d'exploitation puissent être évaluées selon la recommandation du VSA "Définition et standardisation des indicateurs du procédé d'élimination de composés traces organiques dans les STEP" [5].

Dimensionnement optimal de l'étape MP:

En ce qui concerne le dimensionnement et les redondances de l'étape MP, il convient de s'en tenir à la recommandation du VSA "Volume d'eaux usées à traiter et redondances des étapes de traitement des micropolluants" [2]. Une étape MP doit être conçue selon cette recommandation, pas uniquement pour des raisons de rentabilité mais également pour des raisons d'efficacité énergétique. Dans ce contexte, un surdimensionnement n'est pas efficace.

La production d'ozone est à dimensionner de sorte que les générateurs d'ozone puissent être exploités le plus souvent possible dans la plage idéale (représentée par exemple dans la Figure 8). Les besoins spécifiques en énergie (kWh/kg O₃) ne doivent pas être pris en compte en se basant uniquement sur la charge maximale, mais également en considérant la charge partielle. Cette dernière peut être comparée à l'aide des charges préalablement définies pour l'évaluation.

De plus, disposer d'un bon coefficient de transfert des agents d'épuration est très important pour une exploitation efficiente en énergie. Le coefficient de transfert peut être amélioré par une circulation efficace dans les réacteurs et par la sélection d'un système d'apport optimal. La géométrie des bassins et l'hydraulique peuvent être optimisées à l'aide d'analyses CFD. Parmi les éléments analysés figurent notamment la profondeur des bassins, l'agencement des aérateurs ou des agitateurs et l'agencement des chambres d'injection et de réaction. Les systèmes d'injection doivent être dimensionnés de sorte que le transfert de l'ozone ou la répartition du charbon actif dans les eaux usées ainsi que l'élimination des MP s'effectuent avec un haut degré d'efficacité dans toute la plage de réglage.

Un concept de réglage empêchant le surdosage des agents d'épuration doit être planifié. Pour ce faire, les mesures requises doivent être prévues (voir chapitre 4).

Choisir des machines énergétiquement efficaces:

Indépendamment du choix du procédé, il convient aussi d'utiliser pour l'étape MP aussi des machines particulièrement économes en énergie (générateurs d'ozone, pompes, compresseurs, ventilateurs, agitateurs) et de concevoir l'exploitation de manière efficiente du point de vue énergétique [10]. Le dimensionnement et l'utilisation de pompes dotées d'un convertisseur de fréquence correspondant à l'état actuel de la technique garantissent un réglage adapté aux besoins.

Pour la plupart des STEP suisses, la production d'ozone à partir d'oxygène liquide devrait être la solution la plus rentable. La production d'ozone directement à partir d'air sec est moins efficiente que l'utilisation d'oxygène comme gaz d'alimentation, en raison de la faible proportion d'oxygène. Pour des raisons d'exploitation, la production d'oxygène sur site ne devrait se justifier que pour les grandes installations. Du point de vue énergétique, une exploitation avec un flux de gaz variable est plus avantageuse en raison de la forte variation des besoins en ozone des STEP. Mais des installations PSA ou VPSA sont aussi exploitées dans des conditions favorables avec un flux de gaz relativement constant.

Récupération de chaleur:

Environ 90% de l'énergie émise est transformée en chaleur dans le générateur d'ozone. Cette chaleur doit être évacuée et donc utilisée de la manière la plus pertinente possible. Le refroidissement des générateurs d'ozone est presque exclusivement effectué par transfert de chaleur vers l'eau de refroidissement. La récupération de chaleur de l'installation de refroidissement permet d'optimiser les besoins en énergie thermique des bâtiments d'exploitation ou de les couvrir en partie. Comme l'eau de refroidissement doit être aussi froide que possible, normalement les rejets thermiques ne peuvent pas être utilisés directement. En raison du niveau peu élevé des températures et de la production fortement variable de ces rejets thermiques, une utilisation pour chauffer les boues en vue de la digestion n'est pas réaliste.

Exemple de cas portant sur l'efficacité énergétique lors de la planification:

L'assainissement ou l'optimisation d'une STEP offre souvent la possibilité de procéder à une optimisation globale de l'énergie, qui ne se limite pas seulement à l'étape MP. Des étapes de procédés efficaces et parfaitement coordonnées entre elles permettent même de surcompenser le supplément de consommation d'une étape MP, comme le montre l'exemple suivant: la STEP de Kloten Opfikon doit être agrandie par rapport à la charge et à l'hydraulique, afin de pouvoir traiter la charge supplémentaire générée par la croissance du bassin versant. A cette occasion, toutes les étapes de traitement de la STEP sont rénovées ou optimisées. Par ailleurs, une ozonation visant à éliminer les micropolluants est intégrée, avec une filtration sur sable existante.

Le traitement biologique est désormais effectué à l'aide du procédé Nereda[®], un procédé de traitement biologique des eaux usées basé sur le procédé SBR (Sequencing Batch Reactor). L'un des principaux avantages du Nereda[®] réside dans sa faible consommation d'énergie. Le gain d'efficacité du procédé Nereda[®] (env. 10 kWh/EH/a) est plus important que la consommation d'électricité supplémentaire induite par l'ozonation (env. 6 kWh/EH/a). Ainsi, malgré l'étape MP supplémentaire, l'exploitant consomme moins d'électricité qu'avec une installation à boues activées sans étape MP [13].

5 Efficacité énergétique dans l'exploitation

Le maintien du bon fonctionnement des étapes de traitement situées en amont constitue la meilleure garantie d'une élimination efficace des MP. Des concentrations (COD, DCO, $\text{NO}_2\text{-N}$) en sortie peu élevées en sortie du décanteur secondaire génèrent des besoins plus faibles de réactifs d'épuration (ozone, CAP) pour le même rendement d'élimination des micropolluants. En ce qui concerne les installations de CAG, des concentrations peu élevées à l'entrée de la filtration sur CAG augmentent la durée de vie du CAG. La concentration en MES influence la fréquence des rétrolavages des filtres.

Des stratégies de commande et de réglage robustes ainsi qu'une surveillance fiable de l'exploitation sont nécessaires pour une exploitation efficace. Un dosage optimal et adapté à l'objectif d'épuration permet d'abaisser la consommation de réactifs d'exploitation et donc d'énergie. De nouvelles stratégies de régulation ont déjà été développées et testées dans la pratique. Cette solution permet de mieux adapter la consommation de réactifs d'exploitation au besoin réel. Des surdosages peuvent ainsi être évités, ce qui permet de diminuer les besoins en énergie.

À la place d'un réglage proportionnel au débit, il est possible d'opter pour un réglage selon l'absorbance UV. L'absorbance UV est une grandeur permettant de mesurer les substances organiques (paramètre cumulatif), qui corrèle bien avec l'élimination des composés traces. La mesure de l'absorbance UV est donc un paramètre de remplacement approprié pour l'analyse chimique des éléments traces. La mesure peut par ailleurs être utilisée pour le réglage du dosage de l'ozone ou du CAP. Le principe de mesure peut être décrit comme suit : avec une sonde UV, l'atténuation de la lumière à travers une couche d'eau définie est mesurée à l'aide d'une sonde UV à une longueur d'onde de 254 nm. La valeur de mesure est désignée comme coefficient d'absorption spectrale ($\text{SAK}_{254\text{nm}}$) et a pour unité 1/m.

Il est aujourd'hui recommandé, en complément à la mesure périodique des composés traces, de mesurer l'absorbance UV à 254 nm à l'entrée et à la sortie de l'étape MP (ΔUV) pour surveiller le taux d'épuration. Pour ce faire, une mesure online peut être utilisée, les sondes correspondantes étant disponibles sur le marché. Mais il est également possible d'obtenir des informations sur l'élimination des composés traces en effectuant des mesures UV périodiques d'échantillons mixtes en laboratoire [3]. Le réglage de l'étape MP à la STEP de Neugut à Dübendorf repose sur la mesure de l'absorbance ΔUV ([14]; voir également l'exemple de cas suivant).



Figure 10: Sondes UV à la STEP de Neugut [14]



Figure 11: Sonde UV avec chambre de passage [14]

Il est admis pour toutes les mesures que la durée de vie des pompes et des ventilateurs d'une STEP est d'env. 15 à 20 ans. Il convient donc, pour préserver la valeur du matériel, de remplacer suffisamment tôt les unités obsolètes par des appareils qui correspondent à l'état actuel de la technique du point de vue énergétique.

En règle générale, une collecte complète et uniforme d'indicateurs est recommandée pour le procédé MP. C'est à cela que sert la recommandation VSA " Définition et standardisation d'indicateurs pour les procédés d'élimination des composés traces organiques dans les STEP" et l'outil Excel correspondant [5]. La saisie et le calcul uniforme comprennent en particulier les coûts et la consommation d'énergie, ainsi que la consommation d'agents d'épuration principaux. Cela permet de faire des comparaisons entre les STEP. Concernant l'efficacité énergétique et l'optimisation énergétique dans l'exploitation d'une étape MP, les grandeurs d'entrée suivantes tirées de l'ensemble des données à saisir sont particulièrement intéressantes:

- Consommation d'électricité liée à la production de gaz porteur pour la production d'ozone [kWh/a], dans la mesure où celle-ci a lieu à la STEP. L'oxygène liquide produit en externe ne fait pas partie de ce point,
- Consommation d'électricité de l'étape principale MP [kWh/a],
- Consommation d'électricité liée au traitement MP ultérieur [kWh/a]; si un relevage s'avère nécessaire suite à une perte de charge dans la filtration, sa consommation d'électricité est également prise en compte,
- Quantité consommée des principaux agents d'épuration (LOX, ozone, charbon actif) pour l'élimination des MP [t/a],
- Volume d'eaux usées traité [m³/a].

Ces valeurs d'entrée permettent notamment de déduire certains indicateurs énergétiques:

- Consommation d'énergie primaire MP, sans et avec l'énergie grise importée [kWh/a],
- Indicateurs spécifiques comme la consommation d'électricité et d'énergie primaire par équivalent-habitant [kWh/EH/a], par habitant raccordé [kWh/H_{rac.}/a] ou par volume d'eau usée traité [kWh/m³],
- Part de la consommation d'électricité MP par rapport à la consommation totale de l'électricité de la STEP [%].

Il convient de déterminer et d'évaluer aussi bien les valeurs absolues que l'évolution des valeurs spécifiques. Si les valeurs énergétiques sont élevées, les causes doivent être recherchées et des mesures visant à baisser la consommation d'énergie doivent être mises en œuvre. Pour ce faire, la plateforme " Techniques de traitement des micropolluants" fournit une assistance lors de la collecte des données. La plateforme VSA gère par ailleurs ces données et les évalue à des fins de comparaison.

Exemple de cas concernant l'efficacité énergétique dans l'exploitation:

La STEP de Neugut à Dübendorf est la première STEP suisse qui élimine les micropolluants des eaux usées à l'échelle industrielle par ozonation. Pour garantir une exploitation stable et optimisée, une nouvelle stratégie a été développée et implémentée avec succès. Elle comprend aussi bien des éléments de pilotage que de régulation. Cette stratégie BEAR repose sur la mesure de l'absorbance ΔUV et comprend également un algorithme spécifique. Ainsi, la concentration d'ozone théorique est calculée via différents modules logiques en fonction de la composition des eaux usées. L'objectif est de définir la valeur ΔUV et de la stabiliser autant que possible grâce à un dosage d'ozone adapté aux besoins. Cette stratégie de régulation a fait ses preuves à l'échelle industrielle. La stratégie BEAR permet de générer une valeur ΔUV stable dans une fourchette limitée à $\pm 2\%$ [14] à la STEP de Neugut.

Outre la stratégie BEAR, le concept d'exploitation LOD (Low Ozon Dosage) a également été développé et introduit à la STEP de Neugut. Ce concept d'exploitation repose sur une utilisation variable des deux chambres d'ozonation, ainsi que des différents dispositifs d'injection placés dans ces chambres. Ce concept a permis de diminuer l'apport d'ozone de 15 à 20% tout en respectant le taux d'élimination requis des MP de 80%. Globalement, la STEP de Neugut élimine les micropolluants de manière fiable avec un rendement d'élimination de $82 \pm 2\%$ [14]. En seulement deux ans, les optimisations d'exploitation ont permis de réduire de manière significative la dose d'ozone nécessaire tout en respectant l'objectif d'épuration. L'efficacité énergétique du procédé est ainsi directement améliorée.

6 Liste de contrôle pour la planification et l'exploitation

- **Généralités:** les mesures d'optimisation énergétique ne doivent pas aller à l'encontre du rendement d'épuration requis et de la stabilité des processus. L'épuration des eaux usées et l'exploitation ont la priorité. Mais, dans la pratique, des optimisations énergétiques pouvant avoir des répercussions positives sur l'exploitation de la station d'épuration sont possibles, même dans ces conditions.
- **Étude de variante:** les procédés utilisés doivent également être sélectionnés selon des critères énergétiques. Des concentrations élevées de nitrite à la sortie de la décantation secondaire plaident contre une ozonation.
- **Planification du projet:** selon les possibilités, les installations doivent être conçues de sorte qu'il en résulte de courtes distances et des installations compactes. Les pertes de charge du filtre doivent être optimisées. Un choix judicieux et le dimensionnement de la variante de procédé permettent-ils de renoncer à une station de relevage? Si une station de relevage est indispensable, elle doit être dimensionnée de manière optimale en tenant compte du chapitre 2 issu du guide "Énergie dans les STEP" [1].
- **Planification du projet:** lors de la planification de l'étape MP, l'ensemble de l'installation doit être prise en compte. Il convient de garder à l'esprit l'influence de l'étape biologique sur l'étape MP et inversement.
- **Planification du projet:** des concepts énergétiques globaux, CVC inclus, doivent être élaborés. Les rejets thermiques des installations d'ozonation doivent être utilisés dans la mesure du possible et le charbon actif des installations CAG doit être réactivé. La planification d'une étape MP doit aussi être l'occasion de réaliser une analyse énergétique poussée selon le chapitre 8 du guide "Énergie dans les stations d'épuration" [1].
- **Planification du projet:** l'efficacité de l'écoulement et de l'injection dans les réacteurs (d'ozonation) peut être améliorée à l'aide d'analyses CFD. Un apport de réactifs d'exploitation optimisé augmente l'efficacité énergétique. En principe, l'alimentation en gaz dans une installation d'ozonation est similaire à l'aération de la biologie. C'est pourquoi le chapitre 4 du guide "Énergie dans les STEP" [1] doit être pris en compte.
- **Exécution:** lorsque des réflexions d'ordre économique sont menées, il convient de prendre en compte l'ensemble des coûts sur toute la durée de vie de l'installation. Une variante avec les coûts externes doit être présentée pour les installations publiques, selon la norme SIA 480. Mais cela ne suffit pas car la consommation d'énergie n'est pas toujours optimisée. Le critère "Besoins énergétiques" doit donc être également inclus comme critère d'évaluation dans les appels d'offres.
- **Exploitation:** les besoins énergétiques de l'étape MP peuvent être optimisés grâce à un traitement biologique préalable et une décantation secondaire efficaces (COD, MES, nitrite). Il convient donc de s'assurer que les étapes de traitement placées en amont fonctionnent correctement.
- **Exploitation:** la consommation d'agents d'épuration et d'électricité de l'étape MP doit être identifiée et évaluée conformément à la recommandation du VSA "Définition et standardisation d'indicateurs pour les procédés d'élimination des composés traces organiques dans les STEP" [5]. Sur cette base, la consommation d'agents d'épuration et d'électricité peut être optimisée de manière ciblée.
- **Exploitation:** les procédés sont constamment perfectionnés sur le plan de l'efficacité énergétique. Citons par exemple l'optimisation permanente des concepts de régulation ou du dosage selon les expériences acquises au fil du temps et l'état de la technique.
- **Formation et perfectionnement:** les professionnels de l'épuration des eaux ainsi que les bureaux de planification concernés par les MP s'informent en permanence sur les dernières évolutions techniques dans ce domaine et leurs conséquences énergétiques.

7 Perspectives

Pour pouvoir prétendre à l'indemnisation, les STEP contraintes par la loi d'éliminer les micropolluants, doivent avoir commencé la réalisation de l'étape supplémentaire d'ici 2035. Jusqu'à cette date, les besoins énergétiques des procédés d'élimination des MP gagneront en importance. La consommation d'énergie supplémentaire est décisive pour chaque STEP concernée et doit être optimisée. À l'échelle de la Suisse, la consommation supplémentaire est raisonnable compte tenu des avantages supplémentaires pour la protection des eaux. Mais cela correspond à l'exigence légale d'optimiser tous les processus du point de vue énergétique et de couvrir la consommation supplémentaire par des énergies renouvelables, si possible. La consommation d'énergie supplémentaire doit donc être déjà compensée au niveau des différentes installations par des mesures appropriées qui permettent d'améliorer l'efficacité énergétique globale de la STEP. L'objectif doit être de compenser la consommation supplémentaire attendue des futures étapes MP au niveau national par une augmentation de l'efficacité et de la production énergétique dans la STEP.

Lors de l'évaluation de l'efficacité énergétique des procédés, la prise en compte des besoins d'énergie primaire permet la comparaison directe de différents procédés. La conversion en équivalents CO₂ permet également d'établir des comparaisons avec d'autres processus influant sur le climat. L'énergie liée à la production d'oxygène et d'ozone peut être produite en Suisse et peut également être fabriquée à partir d'énergies renouvelables. Il est souhaitable de fabriquer du charbon actif à partir de matières premières locales et renouvelables. Mais le charbon actif doit être actuellement importé (et cela nécessite donc beaucoup d'énergie grise). Il existe donc une certaine dépendance vis-à-vis des fournisseurs.

En tenant compte de l'ensemble du cycle de vie, l'ozone et le CAP nécessitent une quantité quasi semblable d'énergie primaire. Contrairement au procédé CAG, la consommation d'énergie du traitement complémentaire ou de la séparation de charbon actif doit être prise en compte dans le cas des procédés à l'ozone et au CAP [6]. Les procédés CAP doivent être considérés comme très prometteurs du point de vue énergétique, si les durées de vie attendues ou requises pour la rentabilité du procédé peuvent être atteintes. Mais ces données sont encore entachées de grandes incertitudes. Des projets CAG en cours ou prévus à l'échelle industrielle fourniront des réponses à ces questions au cours des prochaines années. Outre le charbon actif et l'ozone, d'autres procédés novateurs sont également envisageables et pourront constituer des alternatives à l'avenir. Il convient ici aussi de prendre en compte les aspects énergétiques de manière conséquente.

Le potentiel d'optimisation future des étapes MP est grand. Mais celui-ci n'a été que peu exploité jusque-là, car les exploitations à l'échelle industrielle sont rares. Au cours des prochaines années, de nouvelles données sur la consommation d'énergie d'installations à l'échelle industrielle seront fournies en continu. De nouvelles solutions d'optimisation de la configurations de procédés et de modes d'exploitation sont attendues. Un échange d'expériences ciblé permettra de continuer à optimiser les installations, notamment du point de vue énergétique. La recommandation du VSA "Définition et standardisation d'indicateurs pour les procédés d'élimination des composés traces organiques dans les STEP" [5] peut être utilisée à cet effet. Une campagne d'optimisation énergétique à l'échelle de la Suisse pourrait être organisée dans quelques années sur la base des chiffres, des évaluations et des indicateurs énergétiques développés et collectés en continu. Cela pourrait par exemple être réalisé par InfraWatt en collaboration avec le VSA et la plateforme "Techniques de traitement des micropolluants", avec le soutien de l'OFEV et de l'OFEN. Cette campagne contiendrait des sessions d'information, des offres de formation ainsi que des prestations de conseil.

Des informations seront fournies à ce sujet sur le site Internet de la plateforme "Techniques de traitement des micropolluants": www.micropoll.ch. La plateforme VSA sert au développement et au transfert de connaissances, ainsi qu'à l'échange d'expériences relatives aux procédés techniques permettant d'éliminer les micropolluants dans les STEP communales. Des articles sont régulièrement publiés sur de nouveaux procédés, projets pilotes et projets menés à l'échelle industrielle [17].

Le chapitre relatif à l'efficacité énergétique dans les installations MP sera actualisé d'ici cinq ans environ sur la base des expériences d'exploitation acquises jusque-là.

8 Références

- [1] VSA, OFEN 2008: "Énergie dans les stations d'épuration - Guide de l'optimisation énergétique des stations d'épuration des eaux usées", Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA) et Office fédéral de l'énergie (OFEN), Zurich/Bern
- [2] VSA 2015: "Volume d'eaux usées à traiter et redondances des étapes de traitement des micropolluants", recommandation, VSA, Zurich
- [3] VSA 2016: "Concepts de surveillance de l'efficacité d'épuration des étapes de traitement supplémentaires permettant l'élimination des micropolluants", VSA, Zurich (plateforme "Techniques de traitement des micropolluants")
- [4] VSA, 2017: "Vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation", recommandation, VSA, Zurich
- [5] VSA, 2016: "Définition et standardisation d'indicateurs pour les procédés d'élimination des composés traces organiques dans les STEP", recommandation en consultation, VSA, Zurich
- [6] VSA, 2016: "Micropolluants", script du niveau de formation A3/A4/A7, VSA, Zurich
- [7] Abegglen, C., Siegrist, H. 2012: "Micropolluants dans les eaux usées urbaines – Étape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration", Connaissance de l'environnement n° 1214, Office fédéral de l'environnement, Berne.
- [8] Abegglen, C. 2011 et. al.: "Micropolluants - Consommation d'énergie et coûts des traitements avancés dans les STEP communales", Gas Wasser Abwasser n° 7/2011 (aujourd'hui appelé Aqua & Gas)
- [9] Moser, R. 2011: "Weitergehende Abwasserreinigung: Kosten und Aufwand", Hunziker Betatech AG, présentation réalisée lors du cours de perfectionnement VSA, Emmetten
- [10] Müller, E., Vogelsanger, M., Moser, R., Frei, U. 2015: "Elektrische Antriebe bei Infrastrukturanlagen - Potentialanalyse und Massnahmenkatalog", OFEN / InfraWatt, Berne/Schaffhausen
- [11] Holinger AG, 2012: "Efficacité énergétique et production d'énergie dans les STEP", Baden
- [12] Benstöm, F., et. al.: "Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen", Korrespondenz Abwasser, Abfall n°3, 2016
- [13] TBF + Partner AG, 2016: "Abwasserreinigung Kloten Opfikon AKO – Ausbau ARA Kloten Opfikon 2020", Technischer Bericht Bauprojekt, INGE TBF – Pöyry, Zurich
- [14] Schachtler, M., Hubaux, N. 2016: "Élimination stable des micropolluants avec Bear – Stratégie de contrôle de l'ozonation innovatrice avec des sondes UV", Aqua & Gas n° 5, 2016
- [15] Kapp H., Metzger S. 2017: "CAP dans le traitement des boues", Aqua & Gas n° 1, 2017
- [16] Groupe de travail DWA, chapitre 8.6: "Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung", rapport de travail, Korrespondenz Abwasser, Abfall n° 12, 2016
- [17] <https://www.micropoll.ch/plattform/>

