PROTÉGER LES COURS D'EAU EN RESPECTANT LE CLIMAT

DIMINUER L'EMPREINTE CARBONE LORS DE L'ÉLIMINATION DES COMPOSÉS TRACES ORGANIQUES DANS LES STATIONS D'ÉPURATION

Le traitement des eaux usées communales à l'ozone ou au charbon actif diminue l'apport de composés traces organiques dans les cours d'eaux. Ce faisant, les ressources d'exploitation nécessaires entrainent une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Le présent article montre quelles mesures peuvent prendre les exploitants de STEP pour minimiser l'augmentation de l'empreinte CO_2. Ces mesures peuvent également leur permettre de diminuer les coûts d'exploitation.

Aline Meier, plateforme VSA «Techniques de traitement des micropolluants»*
Christian Remy, Centre de compétences sur l'eau de Berlin

Contexte

Des composés traces organiques tels que les résidus de médicaments ou de produits cosmétiques peuvent avoir des impacts négatifs sur la vie aquatique même en faible concentration [1]. En Suisse, certaines stations d'épuration des eaux usées (STEP) seront équipées d'étapes de traitement visant à éliminer les composés traces d'ici 2040. Les nouvelles étapes de traitement sont déjà mises en service dans dix stations d'épuration. Des procédés à l'ozone, au charbon actif en poudre (CAP) ou au charbon actif en grains (CAG) conviennent à cette optimisation de STEP [2]. La pollution des cours d'eaux par les composés traces diminuera ainsi fortement, ce qui contribuera à améliorer la qualité des eaux [1, 3].
Les avantages de ces étapes de traitement sont incontestables. Mais leur exploitation nécessite l'utilisation de ressources d'exploitation supplémentaires, qui génèrent des émissions de gaz à effet de serre et d'autres impacts environnementaux. Les STEP ne représentent qu'un faible pourcentage de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre suisses et l'élimination des composés traces n'est que l'une des étapes de traitement mises en œuvre. Néanmoins, les impacts sur l'environnement engendrés par l'exploitation de ces étapes de traitement supplémentaires doivent être réduits au minimum.
Le présent article identifie les facteurs qui contribuent fortement à l'empreinte CO_2 des différents procédés utilisés dans les stations d'épuration suisses. Ces connaissances soutiendront la planification et surtout l'optimisation de l'exploitation des étapes de traitement visant à éliminer les composés traces. Un grand nombre de mesures destinées à réduire l'empreinte CO_2 permettent également de réduire les coûts des ressources d'exploitation et de l'électricité. Une protection des eaux respectueuse du climat peut donc aussi s'avérer intéressante du point de vue économique.

** Contact: aline.meier@vsa.ch*

CONTENU

1. METHODOLOGIE UTILISÉE POUR ÉVALUER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX 3
2. EMPREINTE CO_2 DE L'ÉLIMINATION DES COMPOSÉS TRACES 3
2.1. HYPOTHÈSES 3
2.2. IMPORTANCE DE L'INFRASTRUCTURE 5
2.3. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DE L'ÉTAPE D'ÉLIMINATION DES COMPOSÉS TRACES 6
2.4. COMPARAISON AVEC LES AUTRES PROCESSUS D'ÉPURATION DES STEP 7
2.5. COMPARAISON AVEC LES DONNÉES D'EXPLOITATION D'INSTALLATIONS RÉALISÉES 7
2.5.1. Installations CAP 7
2.5.2. Installations d'ozone 8
2.5.3. Consommations d'électricité 9
3. MESURES PERMETTANT DE RÉDUIRE L'EMPREINTE CO_2 9
3.1. MESURES LES PLUS EFFICACES POUR LE CAP 9
3.1.1. CAP fabriqué à partir de matières premières renouvelables ou CAP contenant une part élevée de produit réactivé 9
3.1.2. Minimiser le dosage de CAP 10
3.2. MESURES LES PLUS EFFICACES AVEC LE CAG 10
3.2.1. Utiliser du CAG issu de matière première renouvelable 10
3.2.2. Minimiser la consommation de CAG 10
3.3. MESURES LES PLUS EFFICACES POUR L'OZONATION 11
3.3.1. Minimiser la consommation d'ozone 11
3.3.2. Réduire la consommation d'électricité dans la STEP 12
3.3.3. Utiliser de l'électricité verte 12
3.3.4. Autres économies 12
4. BILAN 13
BIBLIOGRAFIE 14

1. METHODOLOGIE UTILISÉE POUR ÉVALUER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les impacts environnementaux des systèmes techniques sont généralement évalués avec des bilans écologiques [4, 5]. Ces derniers comprennent une analyse complète de tous les impacts environnementaux potentiels sur le sol, l'air et l'eau et prennent en compte tous les flux de substances dans les systèmes situés en amont et en aval, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination.
Par ailleurs, les impacts environnementaux supplémentaires et les coûts des mesures sont directement comparés avec les bénéfices apportés. Pour ce qui est de l'élimination des composés traces, cela signifie que l'amélioration de la qualité des eaux grâce à l'élimination des composés traces doit être quantifiée afin de pouvoir en évaluer les bénéfices. Différentes études procèdent à l'évaluation de ce bénéfice à l'aide de quelques substances, par exemple [6 - 10]. La présente étude renonce à ce type d'évaluation. Au lieu de cela, les auteurs partent du principe que tous les procédés susmentionnés génèrent le même bénéfice environnemental, car ils respectent le taux d'épuration de 80% exigé par la loi pour une sélection de composés traces. En s'appuyant sur l'état actuel des connaissances, les éventuelles différences peuvent être considérées comme négligeables.
Il ne s'agit donc pas d'un bilan écologique complet, mais d'une évaluation des impacts environnementaux. Les impacts environnementaux des différents procédés visant à éliminer les composés traces peuvent par exemple être évalués sur la base de certains indicateurs tels que la consommation d'énergie primaire ou l'effet de serre ou être agrégés à l'aide d'indices de charge polluante spécifiques *(Tableau 1).* Les auteurs optent pour l'indicateur Effet de serre, car il constitue l'un des problèmes environnementaux les plus urgents auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui. L'effet de serre est exprimé en équivalents CO_2 ou empreinte CO_2 et permet de quantifier la contribution humaine au réchauffement climatique. Le facteur Energie primaire permet de mesurer l'utilisation de ressources fossiles limitées. Il est indirectement déjà contenu dans l'indicateur de gaz à effet de serre via les émissions de gaz à effet de serre liées à leur utilisation. L'indicateur Effet de serre est calculé ici selon le modèle internationalement reconnu du *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)* comme *potentiel de réchauffement climatique* sur une période de 100 ans [11]. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas prise en compte négativement dans cette étude.
Afin de simplifier le calcul, les auteurs se concentrent par ailleurs sur les ressources d'exploitation que sont le charbon actif et l'ozone (fabrication et consommation d'électricité incluses), car elles sont à l'origine de plus de 80% des émissions de gaz à effet de serre générées par l'élimination des composés traces selon [6]. Le traitement et l'élimination d'éventuelles boues supplémentaires, la consommation d'agents précipitants et floculants, l'activité de construction et la consommation de matériaux pour la construction des bassins et des bâtiments jouent un rôle bien moins important pour l'effet de serre selon [6]. La consommation de matériaux pour la construction a toutefois été étudiée plus précisément en considérant le contexte suisse dans le paragraphe « Importance de l'infrastructure ». Les aspects sociaux ou économiques ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Impacts environnementaux: / Indicateurs:	Consom-mation d'énergie primaire	Empreinte CO_2	Indices de charge polluante	...
Réchauffement climatique		✓	✓	
Ressource Energie	✓		✓	
Ressource Occupation des sols			✓	
Dommages pour la santé			✓	
...			✓	

Tableau 1. Évaluation simplifiée de l'évaluation des dommages environnementaux provoqués par l'élimination des composés traces – seule l'empreinte CO_2 et donc l'effet sur le réchauffement climatique sont analysés dans le modèle (surlignage vert).

2. EMPREINTE CO_2 DE L'ÉLIMINATION DES COMPOSÉS TRACES

2.1. HYPOTHÈSES

La présente étude comprend un modèle de l'élimination des composés traces dans une station d'épuration suisse avec les trois procédés suivants: ozonation avec filtration sur sable, CAP avec filtration sur sable et filtration sur CAG. Les bases du calcul de l'empreinte CO_2 sont mentionnées dans le *tableau 2*, tandis que *l'illustration 1* montre la limite du système utilisée, ainsi que les hypothèses formulées sur la quantité de ressources d'exploitation nécessaires. Les hypothèses formulées dans le modèle sur la quantité de dosage et la consommation d'électricité sont basées sur le projet *Micropoll [12]*, des essais pilotes, ainsi que les premiers enseignements tirés de réalisations à l'échelle industrielle. Tous les calculs se rapportent à un mètre cube d'eaux usées en sortie de décantation secondaire avec des valeurs d'effluents typiques pour la

Suisse (*Illustration 1*); par rapport aux eaux usées brutes (c'est-à-dire l'entrée de la STEP), les composés traces sont éliminés au minimum à 80%.

	Valeur	Unité	Source
Équivalents CO_2 électricité	181	g eq CO_2/kWh	Mix électrique des consommateurs selon [1]
Équivalents CO_2 oxygène liquide produit en Suisse	260	g eq CO_2/kgO_2	Ecoinvent, adapté au mix électrique suisse
Besoins en électricité pour la production d'ozone	12.50	kWh/kg ozone	[2]
Besoins en électricité pour les filtres à sable ou CAG, station de relevage incluse	0.03	kWh/m^3	[3]
Équivalents CO_2 charbon frais de lignite/houille/noix de coco	14.3 / 11.7 / 6.4	T eq CO_2/t charbon actif	Enquête fabricants DWA 2016, [4]
Équivalents CO_2 produits réactivés charbon de lignite/houille/noix de coco	2.1 / 1.9 / 1.1	T eq CO_2/t charbon actif	Enquête fabricants DWA 2016, [4]
Consommation d'électricité CAP dans STEP	0.02	kWh/m^3	[5]

Tableau 2. Hypothèses formulées pour les calculs de l'empreinte CO_2.

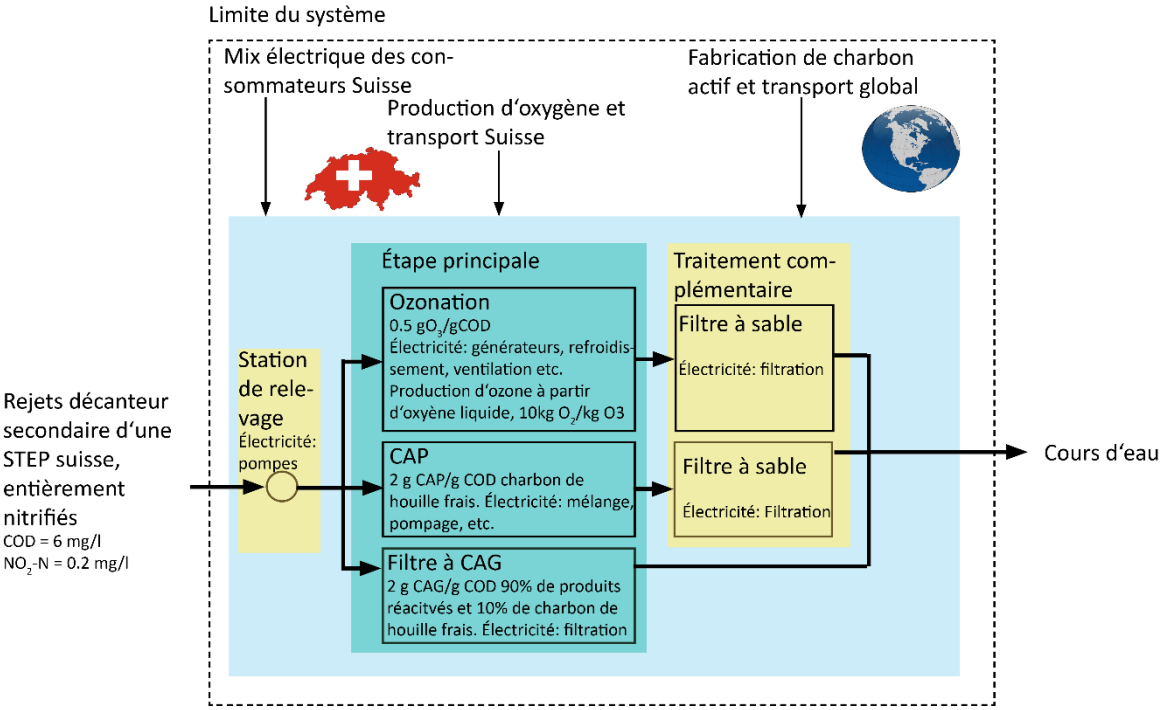

Illustration 1. Limite du système de l'élimination des composés traces modélisée d'une STEP suisse, procédés analysés, consommations d'électricité et hypothèses pour le dosage d'ozone et de charbon actif; jaune = traitement complémentaire et station de relevage (analysés ensemble ci-après), vert = étape principale d'élimination des composés traces, bleu = ensemble de l'étape d'élimination des composés traces.

Un outil spécialement conçu pour ces estimations a servi de base au calcul des émissions liées à la fabrication de charbon actif. Les bases utilisées à cet effet sont mentionnées dans [13]. Le modèle est basé sur l'hypothèse suivante: le CAP est composé à 100% de charbon frais, tandis que le CAG est régénérable et la part de CAG perdue (10%) doit être remplacée par du charbon frais (phase de make-up). En principe, l'empreinte CO_2 des installations à l'échelle industrielle peut être

calculée avec les indicateurs VSA pour l'élimination des composés traces à partir des données d'exploitation actuelles [18]. Le présent modèle utilise un mix électrique suisse ayant une empreinte CO_2 plus élevée (mix de consommation selon [14]), qui prend également en compte les importations d'énergie non renouvelable. Il est également supposé que l'oxygène liquide est produit en Suisse et pas dans l'UE. Le modèle permet une prise en compte différenciée des différents facteurs d'influence, ainsi que la simulation de différents scénarios.
Dans la mesure où le mix électrique suisse (182 g éqCO_2/kWh) a une empreinte CO_2 beaucoup plus faible que le mix européen (450 g éqCO_2/kWh [19]), il joue dans l'analyse globale de l'effet de serre en Suisse un rôle plus faible que dans des études comparables telles que [6]. En revanche, l'infrastructure devrait gagner en importance. C'est pourquoi un examen plus approfondi sera effectué, afin de déterminer si l'influence de la consommation de matériaux pour construire l'infrastructure joue également un rôle secondaire pour les STEP suisses.

2.2. IMPORTANCE DE L'INFRASTRUCTURE

L'influence maximale de l'infrastructure est estimée de manière approximative à l'aide de deux exemples; l'empreinte CO_2 de la consommation de matériaux pour l'infrastructure est calculée à l'aide d'un outil spécialement développé pour l'étude [13]. L'analyse a porté, d'une part, sur les matériaux utilisés pour construire l'ozonation suivie d'une filtration sur CAG à la STEP d'Altenrhein. Cette installation déjà réalisée a permis d'évaluer l'influence maximale de l'infrastructure pour les ozonations, car tous les ouvrages ont été construits à neuf et le traitement complémentaire est plus important que celui du filtre à sable. L'analyse s'est penchée, d'autre part, sur l'étape CAP planifiée à la STEP de Fehraltorf avec un réacteur de CAP, une sédimentation et une filtration (procédé *Ulm*). Cette installation permet d'évaluer l'influence maximale de l'infrastructure pour les procédés au CAP, car il s'agit d'un procédé exigeant des travaux considérables, ainsi qu'un traitement de flux total. La consommation de matériaux pour l'infrastructure a été calculée sur toute la durée de vie des ouvrages [13] et une réserve de 20% a été additionnée pour les matériaux non pris en compte et les incertitudes.
L'illustration 2 montre les calculs pour l'ozonation suivie de la filtration sur CAG: l'infrastructure représente 18% de l'empreinte CO_2 d'une ozonation avec filtration sur CAG; les matériaux béton et acier d'armatures représentent plus de la moitié de l'empreinte CO_2 de l'infrastructure de ce procédé combiné (diagramme circulaire dans *l'illustration 2*). Une ozonation avec filtration sur sable aurait nécessité moins de matériaux de construction, car les filtres à sable sont plus petits que les filtres à CAG. Dans le même temps, l'empreinte CO_2 représentée dans l'*illustration 2* aurait été inférieure d'env. 10 g éqCO_2/m^3 pour une ozonation seule avec une dose d'ozone plus élevée, mais sans CAG. Avec les matériaux de construction utilisés à la STEP d'Altenrhein, la part de l'infrastructure pour une ozonation seule n'aurait été que légèrement supérieure (22%).

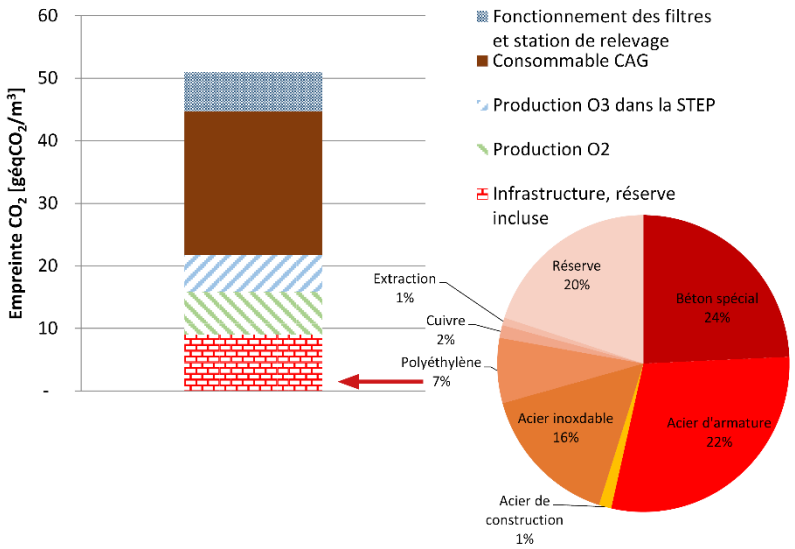

Illustration 2. Calcul de l'empreinte CO_2 de l'élimination des composés traces de la STEP d'Altenrhein prenant en compte la consommation des ressources d'exploitation et l'infrastructure, mise en service à l'automne 2019, hypothèses pour le futur dosage d'ozone: 0.2 g O_3/g COD avec COD=8 mg/l plus consommation d'ozone pour 0.2 mg NO_2/l et CAG: 1 g CAG/g COD, moitié moins que dans le modèle basé sur une préozonation, production de 90% de l'oxygène liquide en CH, 10% dans l'UE, quantités de matériaux de construction estimées par des experts.

Pour la STEP planifiée de Fehraltorf, seules les données des matériaux de construction probablement nécessaires (béton et armature) sont disponibles. Dans la mesure où de nombreux bassins et comparativement moins de conduites et d'autres parties d'installation sont nécessaires pour le procédé *Ulm*, ces données permettent toutefois d'estimer grossièrement la part de l'infrastructure. Les hypothèses sur la consommation de CAP issues de *l'illustration 1* et une réserve de 20% pour les

matériaux de construction non pris en compte font apparaître une part d'infrastructure de 27% dans l'empreinte CO_2. Sans les bassins de sédimentation, l'infrastructure aurait encore représenté 19% dans cet exemple. Cela correspond au procédé de dosage de CAP directement avant une filtration sur sable.
En conclusion, l'influence de la consommation de matériaux est relativement plus importante en Suisse qu'en Allemagne en raison d'un mix électrique plutôt vert, sans toutefois être dominante. Mais il est pertinent d'utiliser des ouvrages existants et ainsi de minimiser les coûts d'investissement et donc de réduire les impacts environnementaux qui en résultent. En revanche, d'autres mesures permettant de baisser la consommation de matériaux ne jouent qu'un rôle mineur pour l'empreinte CO_2. La suite de l'analyse mettra donc l'accent sur la consommation des agents d'épuration.

2.3. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DE L'ÉTAPE D'ÉLIMINATION DES COMPOSÉS TRACES

Les résultats de l'étape de traitement des micropolluants modélisée dans *l'illustration 3* avec les hypothèses issues de *l'illustration 1* montrent que la majeure partie de l'empreinte CO_2 apparaît lors de la production et de l'activation du charbon actif pour les procédés au charbon actif. L'extraction des matières premières, la combustion de la matière première et la vapeur nécessaire à l'activation représentent la majeure partie de la production de charbon frais, tandis que la part de l'électricité et du transport est négligeable. Lors de l'utilisation de CAG, le charbon actif régénéré a une empreinte CO_2 beaucoup plus faible, malgré des quantités de dosage identiques au CAP, car la régénération nécessite uniquement du gaz et aucune matière première supplémentaire. En revanche, environ deux tiers de l'empreinte CO_2 des ozonations sont générés par la consommation d'électricité pour la production d'ozone et l'exploitation du traitement complémentaire dans la STEP, et près d'un tiers provient de la consommation d'électricité pour la production d'oxygène en Suisse.

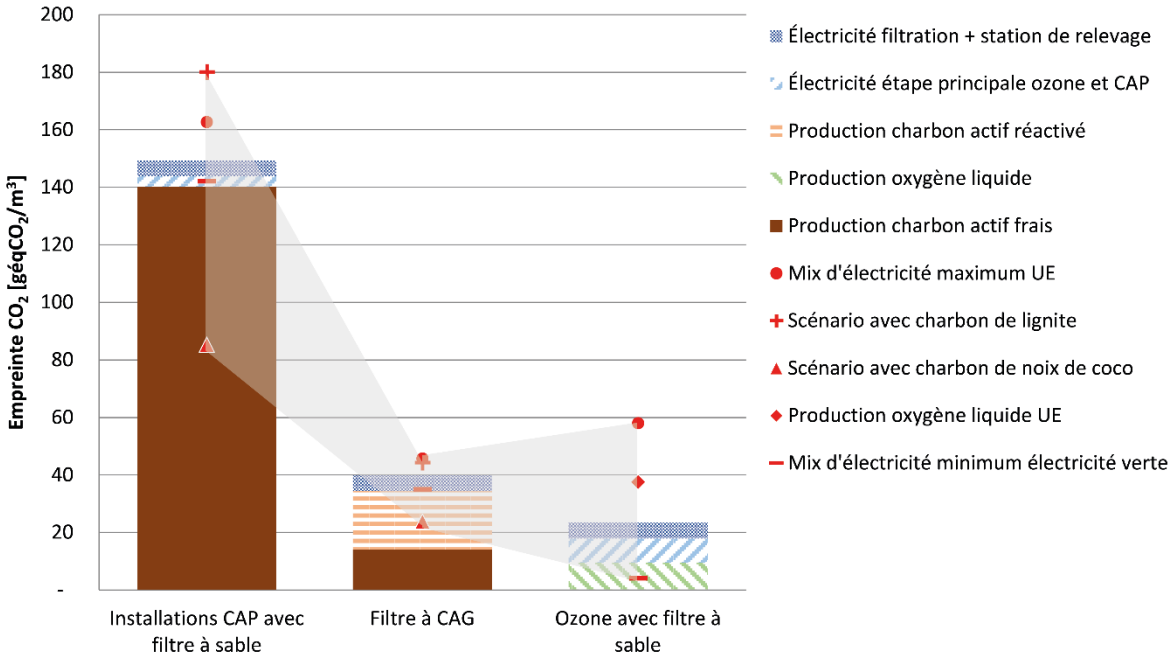

Illustration 3. Comparaison de l'empreinte CO_2 des ressources d'exploitation utilisées dans les différents procédés visant à éliminer les composés traces pour une station d'épuration suisse modélisée avec les hypothèses du tableau 2 et limite du système incluant les hypothèses sur l'utilisation des ressources d'exploitation mentionnées dans l'illustration 1, plage de sensibilité concernant le mix électrique (consommateurs CH, UE ou électricité verte) et matière première utilisée pour fabriquer le charbon actif en gris, sans infrastructure.

Sur la base des hypothèses formulées, l'ozonation génère la plus faible empreinte CO_2 avec 23 g équivalents CO_2/m_3, suivie par le CAG avec 40 g équivalents CO_2/m_3 et le CAP avec 149 g équivalents CO_2/m_3 (*Illustration 3*). Ce faisant, le mix électrique choisi a une grande influence. Si le mix électrique suisse se rapprochait du mix européen, l'ozonation aurait une empreinte CO_2 légèrement plus élevée que la filtration sur CAG. En supposant que la production d'oxygène liquide a lieu dans l'UE et que le mix électrique européen est donc appliqué, le CAG et l'ozone obtiennent des résultats similaires en matière d'empreinte CO_2. Avec le mix de production suisse (sans les importations: 29.8 g équivalents CO_2/kWh [14]), l'empreinte CO_2 de l'ozonation est 6 fois moins élevée qu'avec le mix de consommation.
La modélisation montre également que les matières premières utilisées pour la fabrication du charbon actif ont une grande influence sur l'empreinte CO_2. Si une matière première renouvelable telle que des écorces de noix de coco ou du bois est utilisée pour fabriquer le charbon actif, l'empreinte CO_2 diminue de plus de 40%. Par ailleurs, les produits réactivés s'en sortent beaucoup mieux, ce qui entre en ligne de compte pour la filtration sur CAG.

Compte tenu des hypothèses de base de cette étude et d'une production quotidienne d'eaux usées de 300 litres par habitant, l'élimination des composés traces engendre une empreinte CO_2 supplémentaire par habitant et par jour comprise entre 7 g équivalents CO_2 pour l'ozone et 45 g équivalents CO_2 pour le procédé au CAP. Pour ce qui est du dernier, cela correspond à environ 200 mètres de trajet sur autoroute par jour. Globalement, l'installation CAP d'une STEP moyenne de 30 000 EH génère chaque jour autant d'équivalents CO_2 que 100 personnes en Suisse. Pour que ces valeurs puissent être relativisées dans le processus d'épuration global de la STEP, le prochain paragraphe fournit une comparaison des émissions de gaz à effet de serre générées par les différentes étapes d'épuration.

2.4. COMPARAISON AVEC LES AUTRES PROCESSUS D'ÉPURATION DES STEP

Outre l'élimination des composés traces, les autres étapes de traitement de la STEP génèrent aussi des émissions de CO_2. Selon [20] et [21], les facteurs pertinents sont avant tout la consommation d'électricité pour l'aération de la biologie, les émissions de protoxyde d'azote issues de la biologie et de l'incinération des boues ainsi que les émissions de méthane dans le réseau d'égouts, le décanteur primaire et celles provenant des stocks de boue non couverts (*Illustration 4*). Une estimation approximative a révélé que ces processus génèrent avec le mix de consommation électrique suisse environ 175 g équivalents CO_2 par habitant et jour, ce qui correspond à env. 1% des émissions de CO_2 suisses. La part de l'élimination des composés traces dans les émissions globales de gaz à effet de serre d'une STEP est donc comprise entre 4% pour l'ozone et 20% pour le procédé au CAP. Par conséquent, l'élimination des composés traces joue un rôle mineur dans les émissions totales d'une STEP.

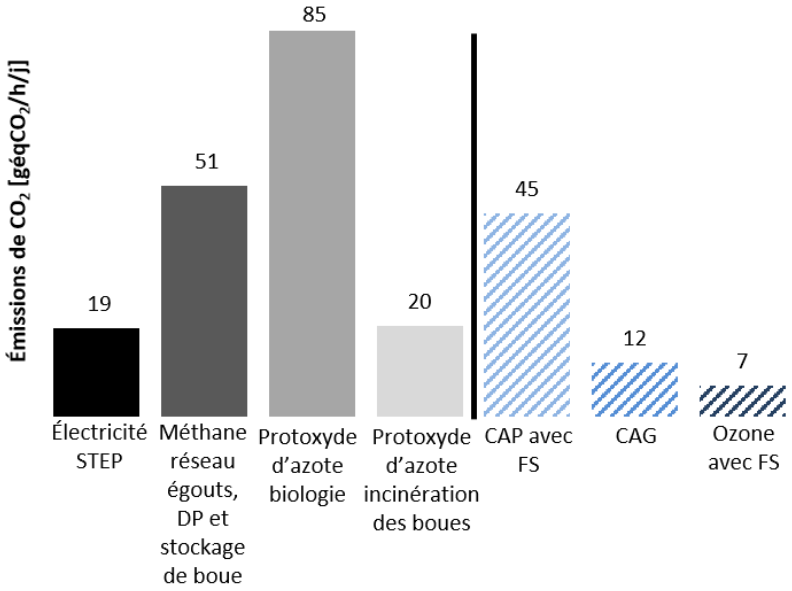

Illustration 4. Émissions de gaz à effet de serre d'une STEP suisse typique par habitant et par jour et comparaison avec les procédés d'élimination des composés traces modélisés. Estimation selon [20], mais avec le mix de consommation suisse. 2% de l'azote entrant est libéré sous forme de protoxyde d'azote [21] (forte variabilité selon les stations d'épuration) et 5% des gaz d'épuration s'échappent des stocks de boue non couverts [22], avec les résultats de l'illustration 3, volume d'eaux usées de 300 l/h/j, besoins en électricité d'une STEP = 39 kWh/personne/an [23]; DP = décanteur primaire, FS = filtration sur sable.

2.5. COMPARAISON AVEC LES DONNÉES D'EXPLOITATION D'INSTALLATIONS RÉALISÉES

La comparaison des émissions de gaz à effet de serre modélisées pour l'étape de traitement des composés traces avec des données d'exploitation provenant d'installations CAP à l'échelle industrielle est représentée dans *l'illustration 5* et celle provenant des installations d'ozone est représentée dans *l'illustration 6*.

2.5.1. Installations CAP

Sur la base des données d'exploitation de 2017 (A.1) et 2018 (A.2), la STEP A a tendance à présenter des émissions de gaz à effet de serre supérieures à celles de l'étape de traitement des composés traces modélisée. Le fait que les eaux usées présentent des charges de COD plus élevées qui entrainent une augmentation de la consommation de CAP est dû au bassin versant à composante industrielle. Par ailleurs, cette STEP utilise un charbon frais à base de lignite, qui génère des émissions de gaz à effet de serre plus élevées que la houille modélisée. La STEP B a une empreinte CO_2 plus faible, car sa consommation de CAP est plus faible que celle de l'étape d'élimination des composés traces modélisée. L'empreinte CO_2 du charbon actif utilisé dans la STEP C est plus faible que celle d'un charbon frais à base de houille. Par ailleurs, la STEP C présente une concentration de COD relativement faible à l'entrée de l'étape CAP. L'empreinte CO_2 de cette installation CAP est donc très faible.

1.6	2.0	1.8	1.8	Quantité charbon actif g CA/g COD
18	16	10	8	Quantité charbon activ g CA/m³
11.1	8.0	ca. 5.5	4.5	COD mg/l

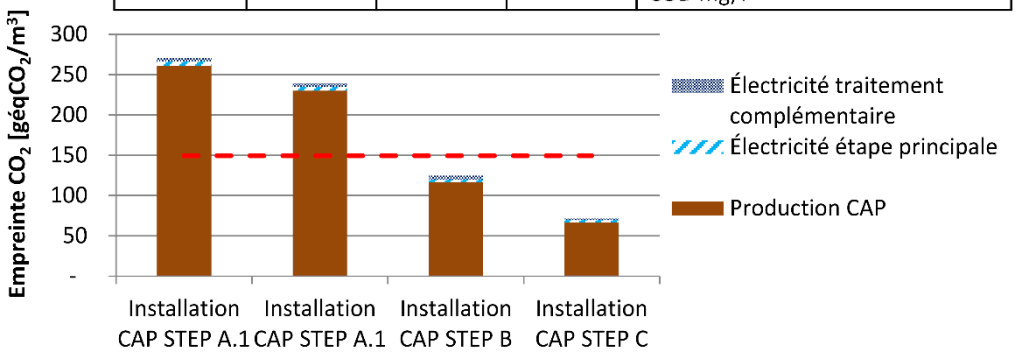

Illustration 5. Composition de l'empreinte CO_2 d'étapes de traitement visant à éliminer les composés traces avec le procédé Ulm (STEP A et B) et un dosage de CAP avant la filtration sur sable (STEP C) en service à l'échelle industrielle en Suisse, à partir des données d'exploitation annuelles 2017 (A.1) et 2018 (A.2 et B) et des données du mois représentatif d'octobre 2019 (STEP C, en service depuis 2019 seulement). Limite du système et hypothèse de mix électrique selon l'illustration 1, rapporté au volume d'eau total traité par la STEP.

2.5.2. Installations d'ozone

Les trois ozonations à l'échelle industrielle étudiées génèrent de plus faibles émissions de gaz à effet de serre que l'étape d'élimination des composés traces modélisée. Cela est dû en partie à une réduction des doses d'ozone rendue possible grâce à un pilotage/réglage optimisé, à de plus faibles concentrations de substances organiques dissoutes (COD) et de nitrite ou à la faible consommation d'électricité du traitement complémentaire.

0.41	0.48	0.55	Quantité ozone gO_3/gCOD
1.9	3.4	2.7	Quantité ozone gO_3/m³
4.8	7.2	ca. 5	COD mg/l
n.n.	0.20	0.01	Nitrite mg/l

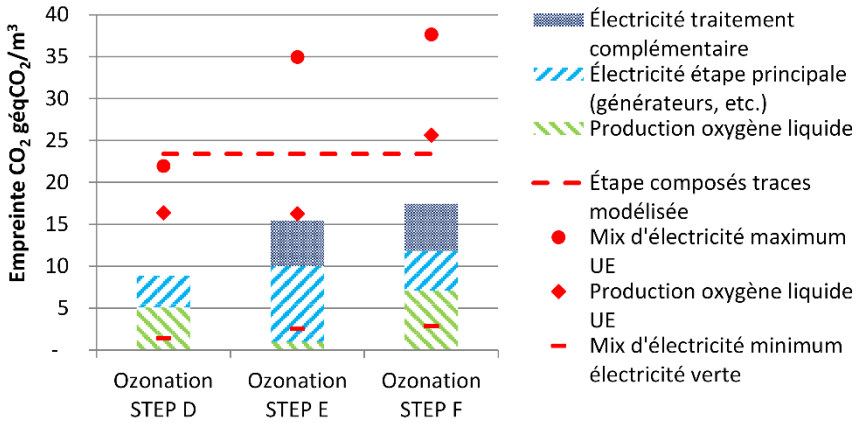

Illustration 6. Composition de l'empreinte CO_2 d'étapes de traitement visant à éliminer les composés traces avec de l'ozone en service à l'échelle industrielle en Suisse, à partir des données d'exploitation annuelles de 2018 ou 2019. Limite du système et hypothèse concernant le mix électrique de l'illustration 1, rapporté au volume d'eau total traité par les STEP, la STEP D ne doit pas relever les eaux usées directement avant l'ozonation et l'exploitation de la filtration ne nécessite pas d'électricité, la STEP E produit 90% de l'oxygène dans la STEP; bleu = générateurs et VPSA (adsorption à pression alternée sous vide pour fabriquer l'oxygène dans la STEP), vert = LOX (oxygène liquide) produit en externe.

2.5.3. Consommations d'électricité

Les consommations d'électricité des installations réalisées sont mentionnées dans le *tableau 3*, afin de permettre une comparaison directe avec les hypothèses modélisées (*voir dernière colonne*). Les données des mises en œuvre à l'échelle industrielle montrent que la consommation d'électricité des installations de CAP et d'ozone sans traitement complémentaire se situe dans une fourchette similaire avec 0.02-0.03 kWh/m^3, ce qui est proche des hypothèses formulées pour le CAP. C'est étonnant, car une consommation d'électricité trois fois plus élevée que pour les installations CAP était attendue jusqu'à présent pour les ozonations. En revanche, l'hypothèse concernant la consommation d'électricité de la filtration (station de relevage incluse) de 0.03 kWh/m^3 correspond bien aux valeurs observées. La part de la consommation d'électricité de l'élimination des composés traces (station de relevage et filtration incluses) dans toute la STEP est comprise entre 5 et 25% dans les exemples mentionnés, ce qui est moins que prévu. Le modèle permet non seulement de comparer les données d'installations à l'échelle industrielle, mais également de simuler différentes mesures d'optimisation visant à diminuer l'empreinte CO_2. Ces mesures sont explicitées dans le paragraphe suivant.

Consommation d'énergie	Unité	STEP A.1 (CAP)	STEP A.2 (CAP)	STEP B (CAP)	STEP C (CAP)	STEP D (ozone)	STEP E (ozone)	STEP F (ozone)	Hypo-thèses modéli-sées
Étape principale de l'élimination des composés traces selon l'Illustration 1	kWh/m^3	0.030	0.026	0.017	0.018*	0.021	0.026 / 0.049 incl. VPSA	0.020	0.020 pour CAP 0.060 pour ozone
Traitement complé-mentaire selon l'Illustration 1	kWh/m^3	0.025	0.022	0.026	0.011**	-	0.030***	0.024	0.030
Part de l'élimination des composés traces dans toute la STEP	%	20	20	11	18	5	25	n.c.	5-30 (sans filtration)

*Tableau 3. Consommation d'électricité dans la STEP, données d'exploitation d'étapes de traitement visant à éliminer les composés traces en service à l'échelle industrielle en Suisse. Limite du système de l'illustration 1, rapporté au volume total d'eaux usées traité de la STEP, VPSA = adsorption à pression alternée sous vide pour fabriquer l'oxygène dans la STEP, la STEP D ne doit pas relever les eaux usées directement avant l'ozonation et l'exploitation de la filtration ne consomme pas d'électricité, la STEP C est en service depuis janvier 2019 seulement: estimations basées sur l'expérience d'exploitation d'un mois représentatif, *station de relevage supplémentaire, **sans station de relevage, ***ventilation et refroidissement supplémentaires.*

3. MESURES PERMETTANT DE RÉDUIRE L'EMPREINTE CO_2

L'élimination des composés traces fournit une contribution importante à la protection des eaux. Le procédé adapté doit être déterminé pour chaque site individuellement. Ce faisant, l'effet de serre peut être intégré dans l'évaluation des procédés, mais il ne peut pas être le critère décisif. Comme les paragraphes précédents l'ont montré, chacun des procédés d'élimination des composés traces augmente l'empreinte CO_2 d'une STEP. Les exploitants doivent donc essayer de la réduire au maximum pour leur procédé. Plusieurs possibilités d'optimisation s'offrent à eux, lorsqu'ils considèrent l'élimination des composés traces avec le reste des étapes de traitement [17]. Les paragraphes suivants détaillent les résultats de la modélisation de différentes mesures pour les procédés au CAP, CAG et à l'ozone et montrent quelles mesures offrent théoriquement l'effet d'économies le plus important. Il convient de vérifier au cas par cas si ces mesures peuvent être mises en œuvre.

3.1. MESURES LES PLUS EFFICACES POUR LE CAP

L'illustration 7 montre les résultats de la modélisation de cinq mesures d'optimisation pour les procédés au CAP et les compare avec l'étape d'élimination des composés traces modélisée dans *l'illustration 3*. Les mesures les plus efficaces sont décrites ci-après.

3.1.1. CAP fabriqué à partir de matières premières renouvelables ou CAP contenant une part élevée de produit réactivé

Un CAP issu d'une matière première renouvelable telle que le bois réduit l'empreinte CO_2 de l'étape CAP de près de 40%. Le projet *Empyrion* montre que les CAP fabriqués à partir de bois peuvent avoir une performance similaire à celle des produits de CAP établis [24]. Par ailleurs, l'Eawag mène actuellement une étude d'envergure sur la performance d'élimination de

produits CAP renouvelables disponibles dans le commerce (le rapport sera publié sur *micropoll.ch*). Les exploitants de STEP pourraient théoriquement effectuer des dosages de ce CAP presque deux fois plus élevés, avant que l'empreinte CO_2 totale de l'installation CAP au charbon de houille ne soit atteinte. Un CAP contenant 50% de produit réactivé a un effet quasiment aussi élevé que le CAP renouvelable en matière de réduction de CO_2. Mais la difficulté réside dans le fait que de nombreux fabricants n'indiquent pas clairement la part de produit réactivé. S'il est possible de réutiliser du CAP présentant une performance d'épuration encore suffisamment élevée issu d'un autre domaine d'utilisation tel que le traitement de l'eau potable, cela peut également diminuer l'empreinte CO_2.

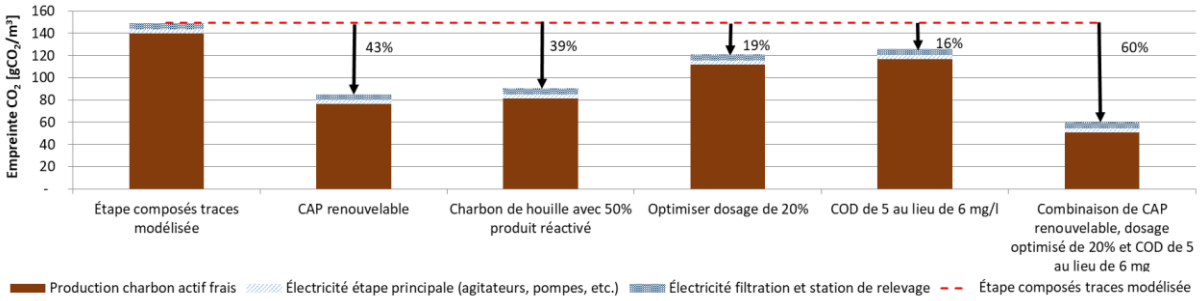

Illustration 7. Empreinte CO_2 modélisée pour les installations CAP basée sur les hypothèses formulées dans le tableau 2 et limite du système de l'illustration 1, différentes mesures permettant de réduire l'effet de serre.

3.1.2. Minimiser le dosage de CAP

Une optimisation de 20% du dosage spécifique d'un CAP à base de charbon de houille pour un taux d'épuration équivalent réduit l'empreinte CO_2 de presque 20%. Les exploitants de STEP peuvent y parvenir en sélectionnant un CAP hautement performant adapté à leurs eaux usées à l'aide de tests par agitation [25], puis en effectuant des dosages adaptés aux besoins.

La variante de procédé joue également un rôle, car les procédés avec recirculation du CAP dans la biologie présentent une charge de CAP plus élevée. Un dosage moins élevé de CAP est donc nécessaire et la concentration de COD en sortie de biologie diminue. S'il devait s'avérer dans la pratique que le procédé *Ulm* avec sédimentation de CAP permet des dosages beaucoup plus bas comparés au dosage avant la filtration sur sable ou dans la biologie, le critère environnemental pourrait être mieux évalué pour ce procédé. En effet, la construction des bassins a une incidence plus faible sur l'empreinte CO_2 que la consommation des ressources d'exploitation. Les premières expériences d'exploitation de la STEP C issues de *l'illustration 5* montrent toutefois que la consommation de CAP dans le procédé de dosage de CAP avant la filtration sur sable est comparable aux procédés *Ulm*. Dans ce cas, le dosage de CAP avant le filtre permettrait de se passer de la sédimentation et ainsi de diminuer l'empreinte CO_2.

Si la concentration de COD à la sortie de la biologie peut être diminuée de 6 mg/l à 5 mg/l, cela réduit la quantité de CAP nécessaire d'un sixième et diminue l'empreinte CO_2 d'env. 15%. Des concentrations accrues de substances organiques difficilement biodégradables dans des eaux usées à composante industrielle se répercutent par conséquent négativement sur l'empreinte CO_2 des installations CAP. Il est donc essentiel de trouver des solutions avec les industries pour traiter à la source les eaux usées hautement concentrées.

S'il est possible de combiner un CAP renouvelable avec une concentration COD plus faible à l'entrée de l'étape CAP et un dosage spécifique plus faible, cela réduit l'empreinte CO_2 d'env. 60% comparé à l'étape de traitement des composés traces modélisée.

3.2. MESURES LES PLUS EFFICACES AVEC LE CAG

Les résultats de quatre optimisations effectuées dans les filtrations sur CAG comparés à l'étape de traitement des composés traces modélisée sont représentés dans *l'illustration 8.* Les paragraphes suivants décrivent les mesures les plus efficaces.

3.2.1. Utiliser du CAG issu de matière première renouvelable

Comme pour le CAP, les exploitants de STEP peuvent également réduire de près de 40% l'empreinte CO_2 des filtrations sur CAG en utilisant une matière première renouvelable. Des matières premières dures telles que les écorces de noix de coco conviennent au CAG. Toutefois, seuls quelques produits sont actuellement disponibles sur le marché, à un prix beaucoup plus élevé ou avec une performance d'épuration moindre.

3.2.2. Minimiser la consommation de CAG

Si un exploitant optimise l'âge du CAG de 20% tout en conservant le même rendement d'épuration, l'empreinte CO_2 diminue d'env. 15%. Des durées de vie plus longues peuvent par exemple être obtenues en choisissant un CAG adapté aux eaux usées concernées. Aucune procédure de test standardisée n'est établie pour le moment. Une autre possibilité consiste à exploiter les cellules filtrantes de manière échelonnée avec des CAG d'âges différents, qui compensent le taux d'épuration entre elles. L'objectif est d'allonger la durée de vie des différentes cellules filtrantes. Il n'existe jusqu'à présent aucune expérience réalisée dans la pratique avec ce mode de fonctionnement échelonné. Une autre possibilité permettant de

prolonger les durées de vie consiste à obtenir un COD réduit à l'entrée de la filtration sur CAG grâce à des mesures prises dans les industries. Si le COD peut être réduit de 6 à 5 mg/l à l'entrée de l'étape CAG, cela diminue l'empreinte CO_2 de 15%. Si une combinaison de toutes les mesures mentionnées dans *l'illustration 8* est possible, cela permettrait de diminuer l'empreinte CO_2 de presque 55% pour les procédés CAG comparé à l'étape de traitement des composés traces modélisée. Dans la mesure où un CAG réactivable est utilisé dans le procédé CAG en lit fluidisé, son empreinte CO_2 est vraisemblablement similaire à celle des filtrations sur CAG. Dans les installations au CAG en lit fluidisé, la filtration finale serait également supprimée. Mais la consommation d'électricité pour le dosage, la préparation du CAG et éventuellement une recirculation interne pour le maintien d'un débit minimal s'ajouterait. Il existe par ailleurs des incertitudes quant à la consommation de charbon des procédés au CAG.

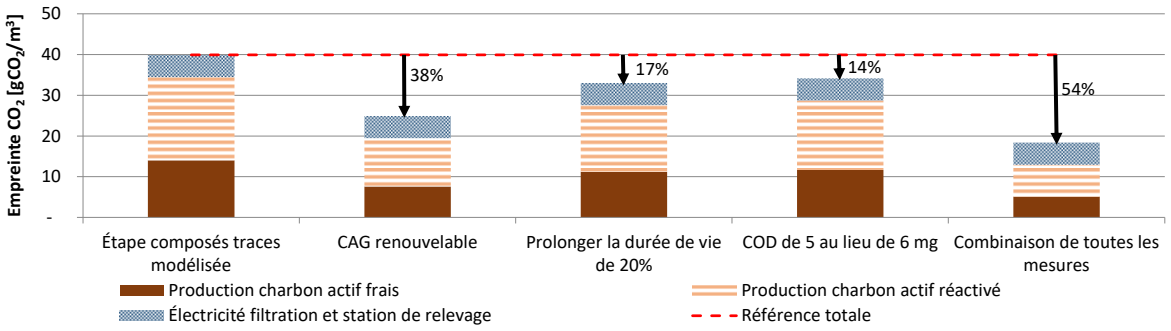

Illustration 8. Empreinte CO_2 de l'étape de traitement des composés traces modélisée pour les filtrations sur CAG basée sur les hypothèses du tableau 2, limite du système mentionnée dans l'illustration 1 et différentes mesures visant à réduire les impacts environnementaux.

3.3. MESURES LES PLUS EFFICACES POUR L'OZONATION

L'empreinte CO_2 des ozonations est presque exclusivement générée par la consommation d'électricité. Un tiers de l'empreinte carbone dans la STEP est générée par l'étape principale et le traitement complémentaire et un tiers par la production d'oxygène liquide. *L'illustration 9* contient les résultats de cinq mesures d'optimisation modélisées et les compare avec l'étape de traitement des composés traces modélisée dans *l'illustration 3*. Les deux prochains paragraphes montrent quelles mesures mentionnées dans *l'illustration 9* permettent de faire les plus grandes économies de CO_2.

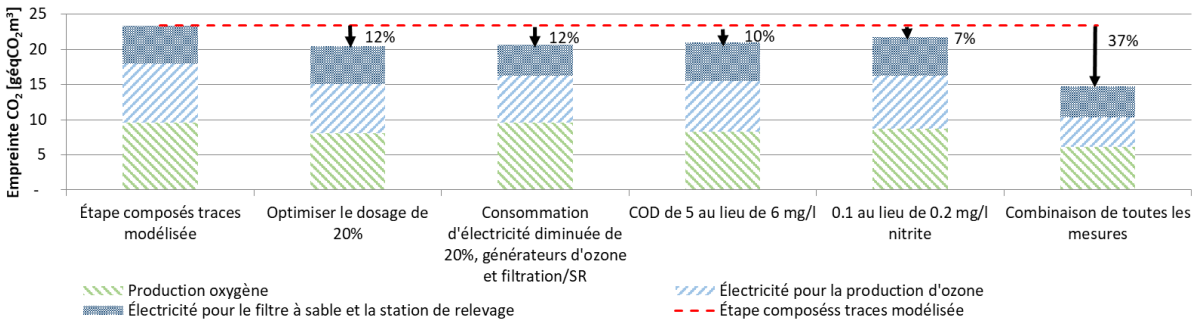

Illustration 9. Empreinte CO_9 de l'étape de traitement des composés traces modélisée pour les installations d'ozone basée sur les hypothèses du tableau 2, limite du système de l'illustration 1 et différentes mesures modélisées pour réduire les impacts environnementaux; SR = station de relevage.

3.3.1. Minimiser la consommation d'ozone

Si un exploitant de STEP peut diminuer la dose d'ozone de 0,5 g O_3/g COD à 0,4 g O_3/g COD pour une performance égale (voir [26] et [27]), l'effet de serre de l'étape de traitement des micropolluants diminue de 10%. Si le COD peut être diminué dans le bassin versant grâce à des mesures, cela se répercute aussi sur l'empreinte carbone dans un ordre de grandeur similaire. Une concentration de nitrite diminuée de moitié à l'entrée de l'ozonation grâce à une aération suffisante entraine une diminution de 5% de l'empreinte CO_2 dans l'étape de traitement des composés traces modélisée. Autre effet secondaire positif: cela permettrait de diminuer les émissions de protoxyde d'azote, ce qui aurait une grande influence sur l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre de la STEP.

3.3.2. Réduire la consommation d'électricité dans la STEP

Une consommation d'électricité réduite de 20% des générateurs d'ozone obtenue par exemple grâce à l'optimisation du fonctionnement, ou de la filtration et de la station de relevage entraine une diminution de 10% de l'effet de serre. Le guide [17] contient des idées pour réaliser différentes économies. Ici, les planificateurs peuvent aussi apporter une contribution importante en dimensionnant les agrégats de manière la plus adaptée possible aux futures conditions de fonctionnement.
Une combinaison de toutes les mesures mentionnées dans *l'illustration 9* réduirait l'empreinte CO_2 d'une ozonation d'env. 35%.

3.3.3. Utiliser de l'électricité verte

Comme le montre *l'illustration 3*, des exploitants de STEP peuvent réduire massivement les gaz à effet de serre générés par leur ozonation, en utilisant dans la STEP de l'électricité issue de sources renouvelables et en s'assurant que leur oxygène liquide est produit en Suisse.

3.3.4. Autres économies

Si l'air sortant de l'ozonation est réutilisé dans la biologie au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère (dans le sens d'une approche globale), l'aération diminuera en conséquence. La STEP D peut ainsi économiser près de 2% de la consommation d'électricité totale de la STEP, ce qui correspond dans cet exemple à 50% de la consommation d'électricité d'une installation d'ozone. Cela s'explique par le fait que les effluents gazeux sont presque exclusivement composés d'oxygène pur. Cela réduit l'empreinte CO_2 de toute l'installation de manière significative. Il convient de vérifier au cas par cas si ce type de solution peut être mise en œuvre. Elle requiert par exemple des systèmes d'aération appropriés et de faibles distances entre l'ozonation et la biologie. La STEP E suit une autre approche. Elle utilise les rejets thermiques des générateurs en hiver pour chauffer les bâtiments de l'exploitation. En été, ces rejets de chaleur sont transmis dans les eaux usées et indirectement employés via l'utilisation de l'énergie thermique en provenance des eaux usées, la température des eaux usées n'augmentant que très peu.
Par ailleurs, la STEP E a opté pour une combinaison de production d'oxygène sur site à l'aide du VPSA et une livraison d'oxygène liquide pour couvrir les pics de consommation. *L'illustration 10* représente aussi bien l'empreinte CO_2 actuelle de la STEP E, qu'une solution hypothétique comportant seulement de l'oxygène liquide pour cette STEP. Ce faisant, on considère que l'exploitant de la STEP E adapterait le fonctionnement des générateurs à oxygène liquide en utilisant un faible débit de gaz et une concentration élevée d'ozone, la quantité d'ozone produite restant alors équivalente. Il est supposé que les générateurs ont besoin de la même quantité d'électricité avec cette modification. Avec la combinaison VPSA et oxygène liquide, la STEP E économise 12% de l'empreinte CO_2 de l'ozonation comparé à une solution fonctionnant seulement avec de l'oxygène liquide. Vous trouverez des réflexions supplémentaires sur la production sur site versus livraison d'oxygène dans [17].

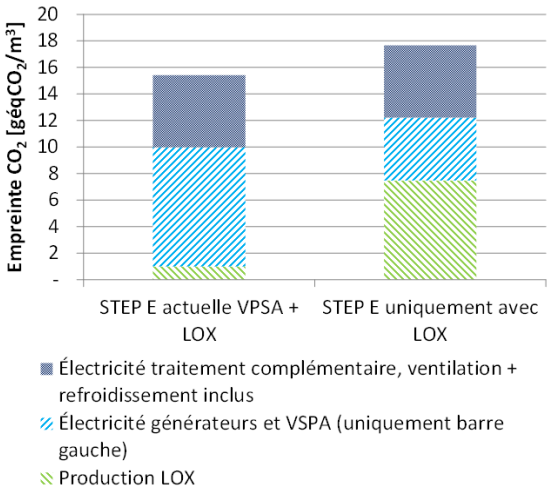

Illustration 10. Exemple d'empreinte CO_2 de l'ozonation de la STEP E. Comparaison avec la situation actuelle (production d'oxygène sur site représentant 88% de l'oxygène combiné à une livraison d'oxygène liquide représentant 12% de l'oxygène) avec solution hypothétique utilisant seulement de l'oxygène liquide.

4. BILAN

L'effet de serre n'est pas le critère décisif pour le choix du procédé d'élimination des composés traces dans les STEP, mais il peut être intégré dans l'évaluation des procédés et ainsi fournir des indications pour réaliser des optimisations d'exploitation.

Nous avons montré, à l'aide d'un modèle d'étape de traitement des composés traces typique pour la Suisse incluant les ressources d'exploitation, que l'ozonation est le procédé qui génère le moins d'émissions de gaz à effet de serre au vu des hypothèses formulées. En comparaison, l'empreinte CO_2 des installations au charbon actif en poudre est six fois plus élevée et celle des filtres au charbon actif en grains est deux fois plus élevée. Le CAG obtient de bien meilleurs résultats que le CAP, car il est régénérable. L'hypothèse retenue sur le mix électrique a une grande influence sur l'empreinte CO_2 de l'ozonation et celle retenue sur la matière première a une grande influence sur l'empreinte CO_2 du charbon actif. Par conséquent, il est toujours important de communiquer les hypothèses retenues lors de la comparaison des procédés et de calculer différents scénarios.

La contribution de l'élimination des composés trace aux émissions de gaz à effet de serre dans toute la STEP est d'un cinquième maximum, selon le procédé utilisé. Par ailleurs, les STEP ne sont responsables que d'environ 1% des émissions de gaz à effet de serre en Suisse. Cependant, les émissions supplémentaires doivent être réduites au minimum. La diminution de l'utilisation de matériaux pour l'infrastructure a une moindre importance. Les plus grandes économies peuvent être réalisées via une optimisation de l'exploitation de l'élimination des composés traces.

Si les concentrations de COD et de nitrite en sortie de biologie ne sont pas encore optimisées, le contrôle de la réduction du COD inerte dans le bassin versant et une aération suffisante de la biologie offrent aux exploitants de STEP de grandes possibilités d'économies concernant l'empreinte CO_2 de l'élimination des composés traces et donc de l'ensemble de l'installation. Pour les installations au charbon actif, choisir un CAP ou un CAG issu de matières premières renouvelables ou contenant une grande part de produit réactivé est la mesure la plus efficace. Une quantité de dosage optimisée a également une grande influence. Les exploitants de STEP peuvent optimiser le dosage en utilisant par exemple un CAP présentant un taux d'épuration élevé pour leurs eaux usées et en dosant en fonction des besoins. Pour les ozonations, les exploitants peuvent réduire l'empreinte CO_2 en combinant une consommation d'ozone minimisée et des optimisations de consommation électrique des différents agrégats comme les générateurs et en choisissant délibérément de l'électricité verte.

Il est réjouissant de constater que de nombreuses installations d'élimination des composés traces à l'échelle industrielle présentent d'ores et déjà en Suisse une empreinte CO_2 plus faible que celle attendue dans l'étape de traitement des composés traces modélisée. Et les optimisations se poursuivent, car la faible consommation des ressources d'exploitation et la faible consommation d'électricité ne réduisent pas seulement le réchauffement climatique, mais se répercutent aussi positivement sur les coûts d'exploitation. La protection des eaux et la protection du climat sont deux objectifs parfaitement combinables et réalisables sur le plan économique.

BIBLIOGRAFIE

[1] *Kienle C. et al. (2015): «Des essais biologiques écotoxicologiques vérifient l'élimination de micropolluants» Aqua & Gas 7/8, p. 18–26*
[2] *Wunderlin P. et al. (2017): «Élimination des micropolluants dans les STEP - État actuel des procédés et évolutions futures» Aqua & Gas 11 p. 60-70*
[3] *Stamm C. et al. (2017): «Les micropolluants influents sur les biocénoses des cours d'eau - résultats du projet EcoImpact» Aqua & Gas 6, p. 90–95*
[4] *International Standardisation Organisation (2006): «ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework» Geneva, Switzerland*
[5] *International Standardisation Organisation (2016): «ISO 14044: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices» Genève, Suisse*
[6] *Jekel M. et al. (2015): «Abschlussbericht IST4R Vergleich verschiedener Verfahrensvarianten der weitergehenden Abwasserreinigung zur Entlastung der Berliner Gewässer» TU Berlin*
[7] *Jamhoury H. (2017): «Life Cycle Assessment of Micropollutants Removal in Wastewater Treatment Plants – Masterarbeit ETHZ»*
[8] *Dazio M. (2011): «Lebenszyklus-Analysen für weitergehende Behandlungsmassnahmen zur Verminderung des Eintrags von Mikroverunreinigungen in die Umwelt – Bachelorarbeit FHNW»*
[9] *Dinkel F. et al. (2015): «LCA of advanced wastewater treatment to remove micropollutants – LCM conference in Bordeaux» https://carbotech.ch/ cms/wp-content/uploads/LCA-micropolutants- Dinkel-LCM-Bordeaux-2015.pdf*
[10] *Rahman S. M. et al. (2018): «Comparative Life Cycle Assessment of Advanced Wastewater Treatment Porcesses for Removal of Chemicals of Emerging Concern» Environmental Science and Technology, Bd. 52, pp. 11346-11358*
[11] *GIEC Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2014): «GIEC – Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II et III tau cinquième Rapport d'évaluation du GIEC» Genève, Suisse*
[12] *Abegglen C.; Siegrist H. (2012): «Micropolluants dans les eaux usées urbaines - Étape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration» OFEV – Connaissance de l'environnement*
[13] *Remy C. (2019): «Dokumentation zum Berechnungstool für THG-Emissionen und Primärenergieverbrauch für Infrastruktur der vierten Reinigungsstufe und Herstellung bzw. Reaktivierung von Aktivkohle – VSA-Tool» Centre de compétences sur l'eau de Berlin, sur www.micropoll.ch*
[14] *Messmer A.; Frischknecht R. (2016): «Umweltbilanz Strommix Schweiz, 2014» sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement.*
[15] *Abegglen C. et al. (2009): «Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf» sur mandat de l'OFEV et d'AWEL*
[16] Plateforme VSA «Techniques de traitement des micropolluants» (2018): *«Aperçu des procédés destinés au post-traitement biologique lors de l'ozonation» www.micropoll.ch/rapports*
[17] *Büeler A. et al. (2018): «Guide Energie dans les stations d'épuration / Élimination des micropolluants – chapitre Efficacité énergétique dans les installations MP» InfraWatt*
[18] Recommandation VSA (2018): *«Définition et standardisation d'indicateurs pour les procédés d'élimination des composés traces organiques» www.micropoll.ch*
[19] *Moro A.; Lonza L. (2018): «Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles» Transportation Research, Bd. Part D 64, pp. 5–14*
[20] *Wunderlin P. et al. (2013): «Émission de protoxyde d'azote lors du traitement biologique des eaux usées: impact, formation et stratégies de réduction» Aqua & Gas, Bd. n° 2, pp. 54–59*
[21] *Gruber W. et al.: «N2O emission in full-scale wastewater treatment: Proposing a refined monitoring strategy» Science of the Total Environment, planifié.*
[22] *Cunningham M.; Baier U. (2015): «Methanemissionen auf Kläranlagen» Aqua & Gas, Bd. n°.3, pp. 60–62*
[23] *Kind E.; Levy G. (2012): «Efficacité énergétique et production d'énergie dans les STEP» sur mandat de l'OFEV*
[24] *Hagemann N. et al. (2019): «Aktivkohle – Made in Switzerland!» Aqua & Gas, Bd. 1/19, pp. 32–38*
[25] *Böhler M. (2019): «Essais en laboratoire visant à déterminer le rendement d'épuration du charbon actif en poudre servant à éliminer les micropolluants dans les stations d'épuration» www.micropoll.ch*
[26] *Schachtler M.; Hubaux N. (2016): «BEAR- Innovative Regelstrategie der Ozonung» Aqua & Gas, Bd. 5, pp. 84-93*
[27] *Hubaux N.; Schachtler M. (2016): «Procédé LOD - oxydation en plusieurs étapes» Aqua & Gas, Bd. 11, pp. 50-56*

REMERCIEMENTS

– Pöyry: *M. Fink, H. Werhonig;* TBF: *D. Bühler, Ch. Alder, Ch. Fux;* Hunziker: *A. Büeler, R. Moser, Th. Hug; Gujer: T. Rieck;* InfraWatt/SuisseEnergie: *E.A. Müller, M. Vogelsanger*
– Exploitants de STEP: *Ch. Egli, P. Sonderegger, B. Bangerter, P. Holderegger, M. Schachtler, Ch. Abegglen;* Eawag: *M. Böhler, E. Morgenroth;* EPF: *S. Pfister*
– Plateforme VSA« Techniques de traitement des micropolluants »: P. Wunderlin, J. Grelot et tout le groupe de travail