

Plateforme VSA

„Techniques de traitement des micropolluants“

Eawag:

Das Wasserforschungs-Institut des ETH - Bereichs

# Charbon actif en poudre – lequel convient ?

**Choix, acquisition et contrôle qualité du CAP pour éliminer les micropolluants**



Juillet 2019

Auteurs A. Meier, Plateforme VSA « Techniques de traitement des micropolluants », c/o Eawag, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf

Marc Böhler, Eawag, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf

Publication Aqua & Gas Januar 2019, p.22 - 30 (version allemand)

Les auteurs remercient les personnes suivantes pour leur contribution à l'élaboration de cet article: groupe de direction de la plateforme «Techniques de traitement des micropolluants» du VSA, Bruno Bangerter (responsable d'exploitation de la STEP de Thunersee), Annette Rössler (KomS), Steffen Metzger (Weber-Ingenieure GmbH) et Bernd Kobler (GVRZ).

Le soutien du KomS et les rencontres du groupe d'échange des exploitants du Bade-Wurtemberg ont énormément encouragé l'échange d'expériences et ont permis aux exploitants suisses de s'informer de l'état des connaissances actuelles.

# SOMMAIRE

## RÉSUMÉ

<b>Sommaire</b> .....	3
<b>Résumé</b> .....	4
<b>1 CONTEXTE</b> .....	5
<b>2 PROPRIÉTÉS DU CHARBON ACTIF</b> .....	7
<b>2.1 Indicateurs</b> .....	8
<b>2.2 Fabrication et réactivation</b> .....	9
<b>3 COMPARAISON DES PERFORMANCES DU CAP</b> .....	11
<b>3.1 Tests par agitation</b> .....	11
<b>3.2 Influence de la matrice des eaux usées</b> .....	13
<b>3.3 Unités utilisées pour définir la consommation de CAP</b> .....	13
<b>4 ÉVALUATION DU CAP APPROPRIÉ</b> .....	14
<b>4.1 Facteurs d'influence</b> .....	14
<b>4.2 Évaluation des offres</b> .....	19
<b>5 EXPLOITATION – CONTRÔLE DU CAP LIVRE</b> .....	21
<b>5.1 Observations des exploitants de STEP concernant la qualité du CAP</b> 21	
<b>5.2 Possibilités de contrôle qualité</b> .....	21
<b>6 BILAN</b> .....	22
<b>7 PERSPECTIVES</b> .....	23
<b>Bibliographie</b> .....	24

## RÉSUMÉ

Actuellement, trois stations d'épuration (STEP) en Suisse utilisent le charbon actif en poudre (CAP) pour éliminer les micropolluants. D'autres stations d'épuration sont en construction ou en cours de planification, ce qui augmentera les besoins en CAP dans les STEP dès les prochaines années.

Les exigences en matière de qualité du CAP varient selon l'utilisation. Il n'existe actuellement pas de produit spécialement développé pour l'utilisation dans les STEP. Les indicateurs courants pour le CAP ne conviennent pas pour décrire sa performance dans l'élimination de micropolluants. Il n'est donc pas clairement défini, quelles caractéristiques un CAP doit posséder pour être efficace dans cette utilisation. La composition des eaux usées exerce une influence considérable sur la performance d'épuration du CAP. Cela signifie que différents produits conviennent plus ou moins bien pour atteindre un objectif de performance identique dans des eaux usées déterminées, et nécessitent ainsi une dose plus ou moins importante.

La difficulté pour les exploitants de STEP consiste donc à trouver, dans la large palette de produits, le CAP présentant un rapport performance/ prix optimal pour leurs eaux usées. C'est néanmoins important, car cela détermine les coûts d'exploitation, la stabilité opérationnelle et les conséquences pour l'environnement.

C'est la raison pour laquelle l'évaluation du produit adéquat au moyen d'essais par vibration ou agitation peut être avantageuse pour la STEP. Ces tests de laboratoire donnent des indications sur la performance d'élimination et donc sur les doses nécessaires et les coûts d'exploitation réels. Des instructions pour la réalisation de ces tests sont disponibles sur [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch) [14]. D'autres facteurs d'influence possibles concernant le choix du CAP sont le prix, la rétention du CAP, la durabilité, les références, les conditions de livraison et le maniement du CAP. Le mode opératoire pour les tests par vibration ou agitation est également utile pour contrôler la qualité des différentes livraisons, car celle-ci peut varier, d'après les expériences d'exploitants du Bade-Wurtemberg. Dans tous les cas, il est recommandé de prélever des échantillons de réserve dans les nouvelles livraisons afin de contrôler les paramètres de qualité contractuels, tels que la teneur en eau ou en cendres, et de mesurer le cas échéant le taux d'épuration.

*Cinq à dix grammes de charbon actif en poudre (CAP) ont la surface d'un terrain de football. Cette poudre noire fascinante peut être utilisée dans différents contextes, par exemple dans les stations d'épuration, pour éliminer les micropolluants des eaux usées, et ce de plus en plus fréquemment. Il existe sur le marché différents produits de CAP qui, vus de l'extérieur, ne se distinguent pas, mais ont néanmoins des propriétés différentes. Cet article est destiné à aider les exploitants et les ingénieurs dans le choix d'un CAP optimal pour le traitement de leur eau usée et dans la vérification de la qualité des livraisons de CAP.*

## 1 CONTEXTE

Le charbon actif (CA) peut être utilisé de diverses manières – y compris et surtout dans la vie quotidienne, que ce soit sous forme de comprimés de charbon ou de filtres au charbon actif destinés au traitement de l'air ou de l'eau. Le charbon actif est de plus en plus utilisé dans les stations d'épuration (STEP) communales pour éliminer les micropolluants (MP). Les exigences légales pour cette optimisation des STEP à l'échelle de la Suisse sont décrites dans [1]. En Suisse, le charbon actif en poudre (CAP) est actuellement utilisé dans les STEP de Herisau, Thunersee (Fig. 1), Wetzikon et Schönau à Cham. La STEP de Penthaz utilise, quant à elle, du charbon actif en grains (CAG). De nombreux projets d'élimination des MP à l'aide de CA sont déjà en construction ou en cours de planification. L'utilisation de CAP dans les STEP va donc s'accroître dans le futur. Le présent article se concentre sur le CAP, même si certains points concernent également le CAG (encadré 1).



*Fig. 1 Etape de traitement au CAP de la STEP de Thunersee, avec bassin de contact, sédimentation et filtration (source: M. Rindlisbacher, STEP Thunersee).*

Les fabricants de CAP proposent généralement un grand nombre de produits et de variantes sur le marché. Il n'existe pas encore de produits spécialement conçus pour une utilisation

dans les STEP. Par ailleurs, la composition des eaux usées à traiter, aussi appelée « matrice des eaux usées », peut être très variable, ce qui influence l'efficacité du CAP.

Les produits de charbon actif présentent de grandes différences de qualité. Le CA est produit à partir de ressources naturelles ou de matériaux recyclés. Or, le type et la composition des matières premières utilisées peuvent varier, ce qui a des répercussions importantes sur les propriétés du CA. Les grands distributeurs essaient donc de maintenir la qualité des matières premières utilisées et le type d'activation à un niveau constant et s'évertuent à maintenir la qualité du produit. Ils produisent généralement le CA eux-mêmes, ont signé des accords à long terme avec leurs fournisseurs de matières premières et contrôlent les processus et les chaînes de livraison. Ces modalités peuvent toutefois varier, en particulier chez les prestataires qui n'assurent que la distribution des produits. Un mélange de différents lots de produits et de différentes qualités est fréquent dans le but d'optimiser le processus de production et l'utilisation des ressources. Il arrive également que les fournisseurs de matières premières changent.

La qualité du CA et son adéquation au traitement d'une eau usée en particulier influencent la quantité de CA nécessaire pour atteindre le taux d'épuration visé. La qualité et l'adéquation du produit ont donc aussi des répercussions sur les coûts, la stabilité de l'exploitation et l'environnement comme le montre le retour d'expérience des exploitants du Bade-Wurtemberg (D), où, depuis déjà plusieurs années, de nombreuses installations de traitement au CAP (par la suite, « étape CAP ») sont en service à l'échelle industrielle. Dans certains cas, ils ont observé que la qualité du CAP pouvait varier entre les différentes livraisons d'un même produit ou que certains types de produits n'étaient plus disponibles durant un certain temps. Ainsi, les exploitants devraient identifier au préalable des produits alternatifs ayant une performance similaire et un examen plus poussé des produits devrait être mené pour garantir un traitement des micropolluants stable et rentable.

C'est dans ce contexte qu'utilisateurs et experts approfondissent cette thématique. Des exploitants, des fabricants de CA, des groupes de recherche et des ingénieurs réunissent une quantité croissante de connaissances en se basant sur les installations en service et les projets de recherche. Ces efforts et ces activités étant encore en cours, les recommandations et les informations exposées ci-après ne sont pas établies de manière définitive. Cet article doit, en premier lieu, aider les exploitants et les ingénieurs à clarifier les questions suivantes de la manière la plus simple possible et selon l'état actuel des connaissances:

- Quels CAP conviennent à mon type de procédé et à ma matrice d'eaux usées?
- Comment doser le produit pour obtenir le rendement d'épuration souhaité pour ma STEP?
- Comment obtenir une vue d'ensemble des distributeurs et des produits?
- Comment lancer un appel d'offres et contrôler la qualité des livraisons de CAP?

Le présent article synthétise les connaissances issues des sources ci-après (elles comprennent également des informations plus détaillées):

- Article [2] du groupe de travail DWA KA 8.6 et brochure DWA T1/2019 [3]
- Article portant sur l'expérience pratique des exploitants d'installations de traitement au CAP [4] et conseils pratiques issus des rencontres du groupe d'échange entre exploitants « Composés traces dans le Bade-Wurtemberg »
- Tests par agitation réalisés par l'Eawag pour divers projets

### **1) Charbon actif en grain (CAG)**

Nous n'avons encore que peu d'expérience en matière de CAG. Mais grâce à de nombreux essais pilotes et des installations existantes les connaissances à ce sujet augmentent de manière continue. Les chapitres « Contexte » et « Propriétés du charbon actif » sont en grande partie aussi valables pour le CAG. Par ailleurs, les critères permettant de sélectionner le CAP ne diffèrent pas fondamentalement de ceux pour le CAG. Les essais en laboratoire sont toutefois plus complexes en raison de la granulométrie plus grossière du CAG et d'une durée d'exploitation de la filtration s'étalant sur plusieurs mois. Des installations de traitement au CAG existantes et des projets de recherche ont déjà permis d'acquérir une expérience précieuse concernant les appels d'offres pour le CAG et son exploitation. La publication séparée d'un article de synthèse à ce sujet est prévue.

Pour toutes questions, la [plateforme VSA](#) « Techniques de traitement des micropolluants » est disponible à tout moment.

## **2 PROPRIÉTÉS DU CHARBON ACTIF**

L'utilisation du CA dans les STEP n'est qu'un usage possible parmi de nombreux autres. Les exigences de qualité diffèrent selon l'usage prévu. Pour l'utilisation du CA dans l'eau potable, les fiches de travail de l'association allemande des compagnies de distribution des eaux et du gaz DVGW W239 (A) 2011 et W204 2007 présentent des exigences importantes. Dans le cadre de l'utilisation du CA en vue d'éliminer les composés traces des eaux usées communales, il n'existe pas encore de normes. A l'heure actuelle, les propriétés du CA mentionnées dans le Tableau 1 semblent importantes pour une application dans le domaine du traitement des MP dans les STEP.

<b>Propriétés physiques</b>	<b>Importance pour les exploitants</b>
<b>Teneur en eau</b>	Jusqu'à 10 % ; important pour la détermination de la quantité réellement livrée et pour la détermination de la dose spécifique massique par volume d'eau usée.
<b>Teneur en cendres</b>	Important pour la dose spécifique, donne une indication de la proportion de CA réactivé.
<b>Éviter les impuretés</b>	Par exemple, restes d'emballages ou de vis, important pour le transport, le remplissage et le stockage du CAP.
<b>Distribution granulométrique</b>	Important pour le type de séparation du CAP ainsi que son efficacité afin de garantir des pertes minimales de CAP; les petites particules de CAP se chargent plus rapidement mais flocculent moins bien et sont donc plus difficiles à séparer. Du CAP super fin peut être utilisé avec un procédé membranaire.
<b>Masse volumique tassée</b>	Importante pour le stockage; un CAP avec une masse volumique tassée élevée nécessite moins de volume dans le silo.
<b>Pureté</b>	Si seul du charbon neuf est souhaité, la norme EN 12915 contient des spécifications.

Tab. 1 Propriétés physiques du charbon actif en poudre importantes pour les exploitants

## 2.1 Indicateurs

Le CA est en grande partie constitué de carbone et présente une surface élevée comprise entre 500 à 1500 m<sup>2</sup>/g [3, 5], sur laquelle un large spectre de substances peut être adsorbé. Ce spectre comprend de nombreuses substances différentes dans la phase gazeuse ou liquide, dont des MP organiques. Cette aptitude est désignée comme capacité d'adsorption et décrit la performance du CA. Les fabricants fournissent des indicateurs permettant de l'estimer: par exemple la surface BET, l'indice d'iode, l'indice de mélasse, l'indice de bleu de méthylène ou l'indice de nitrobenzène (encadré 2). Les études montrent toutefois qu'il n'y a pas de corrélation ou une corrélation insuffisante entre le taux d'épuration des MP et les indicateurs susmentionnés [6–8].



Plateforme VSA

„Techniques de traitement des micropolluants“

Eawag:

Das Wasserforschungs-Institut des ETH - Bereichs

## 2) Termes relatifs au charbon actif

**Surface BET** : Surface intérieure spécifique d'une substance solide poreuse en  $m^2/g$  [9].

**Indice d'iode** : Un des paramètres les plus couramment utilisés pour caractériser la capacité d'adsorption du charbon actif. L'indice d'iode indique quelle quantité d'iode peut être adsorbée pour une concentration résiduelle définie d'iode en solution par gramme de CAP [mg/g]. Dans la mesure où un atome d'iode occupe une place d'adsorption, ce chiffre corrèle avec la surface intérieure (BET). Il est toutefois plus facile à mesurer [10].

**Indice de mélasse** : Cet indice permet de mesurer le degré de décoloration d'une solution standardisée. Les indices de mélasse de différents charbons actifs varient fortement. Ce paramètre permet de mesurer la teneur en macropores [10].

**Indice de bleu de méthylène** : La quantité du colorant aromatique bleu de méthylène, qui est adsorbée par le CA, donne des indications sur le nombre de mésopores. Ce processus est peu standardisé jusqu'à présent.

**Indice de nitrobenzène** : Besoins en carbone pour une élimination à 90% du nitrobenzène facilement adsorbable [7].

**Masse volumique apparente** : Rapport entre la masse du matériau granulaire en vrac non compacté et de son volume total (volume de grain et volume de grain intermédiaire) [9].

**Masse volumique tassée** : Rapport entre la masse du matériau granulaire tassé d'une certaine manière et son volume [9].

**Répartition de la taille des pores** : Le diamètre moyen des micropores est compris entre 0,2 et 1 nm. Ils représentent env. 95 % de la surface intérieure et jouent un rôle décisif pour l'adsorption. La part des mésopores est beaucoup plus faible, env. 5 %. Ils présentent un diamètre d'env. 1 à 25 nm et jouent un rôle central pour le transport des substances à l'intérieur du noyau du CA. Les macropores n'ont aucune signification pour la surface intérieure [11].

## 2.2 Fabrication et réactivation

Le CA est fabriqué lors d'un processus en plusieurs étapes à partir de matières premières soit fossiles (houille, lignite), soit renouvelables (bois, différentes écorces de fruits, noyaux et

autres matières premières biogènes) [2]. En 2010, 57% du charbon actif vendu sur le marché provenaient de matières premières fossiles. Les matières premières utilisées ainsi que le mode de fabrication et le type d'activation influencent les propriétés du charbon actif et son empreinte écologique. Le CA peut être activé avec du gaz ou par un procédé chimique ; l'activation par gaz étant privilégiée pour une application dans les domaines de l'eau potable et des eaux usées [2]. Le temps de séjour, la qualité ainsi que la quantité de gaz utilisés (gaz CO<sub>2</sub> et vapeur d'eau) et la température du four d'activation influencent l'activation et donc la qualité du CA [2]. Il en résulte un système poreux finement structuré comportant des macropores, des mésopores et des micropores. Certaines tailles de pores sont privilégiées en fonction de l'utilisation. Pour l'élimination d'un large spectre de MP organiques des eaux usées communales, les produits les plus avantageux semblent être les produits comportant une part élevée de mésopores. En effet, ils garantissent un accès optimal aux surfaces d'adsorption internes au noyau du CA [7].

Le CA présente différentes granulométries ; une distinction étant faite entre le CAP (> 95% des particules ayant un diamètre < 0,15 mm selon la norme DIN EN 12903) et le CAG (granulométrie courante sur le marché: 0,5–2,5 mm ou 0,4–1,7 mm selon [2]). Pour fabriquer le CAP, les opérateurs utilisent un tamis ne laissant pas passer le CAG ou réduisent en poudre l'intégralité du produit (Fig. 2) [2]. Lors de la réactivation du CAG, une fraction de particules fines est formée et moulue en CAP [2]. Les fabricants de CA visent à consommer le moins de matières premières possible. Pour ce faire, elles ont recours au « downcycling » en mélangeant par exemple du charbon actif réactivé avec du charbon actif frais (« make-up ») pour obtenir la qualité ou la capacité de rendement initiale. Elles utilisent également du CA de moindre qualité dans des applications ayant des exigences peu élevées ou utilisant des concentrations élevées (p. ex. avec des lixiviats de décharge) [2]. La Figure 2 fournit un aperçu complet de la fabrication et du recyclage du CA. Elle montre que non seulement le CAG mais aussi le CAP peuvent présenter une part de produit réactivé.

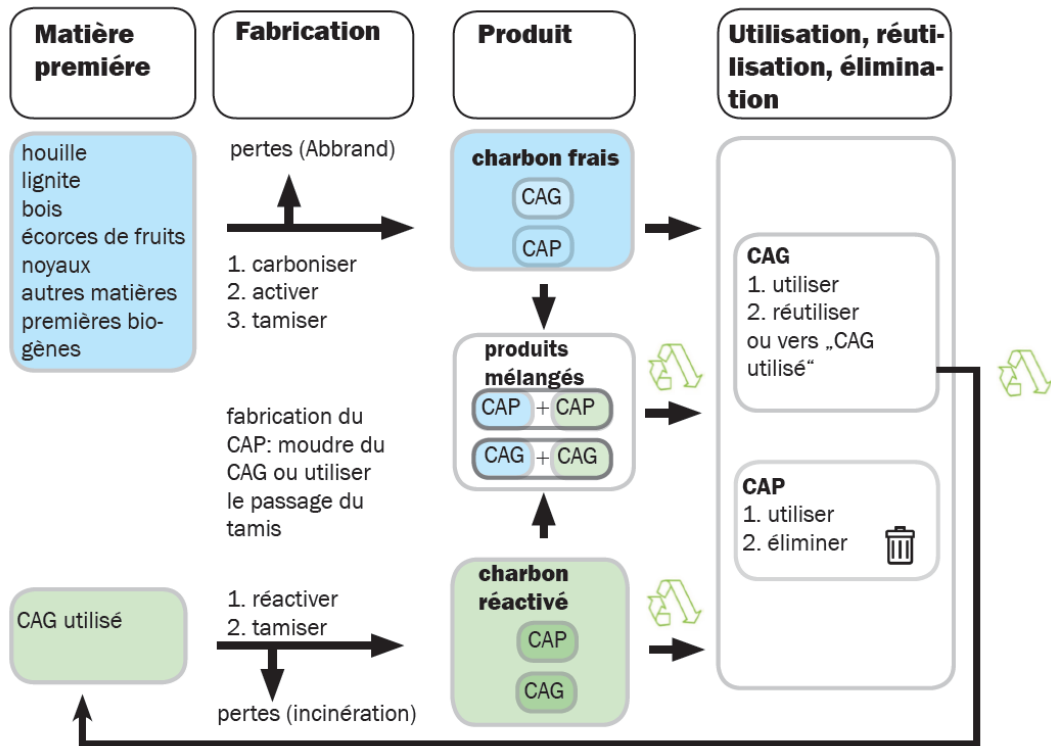


Fig. 2 De la matière première au charbon actif. Le charbon frais est représenté en bleu, le charbon réactivé en vert. Les flèches vertes marquent les processus qui appartiennent au « downcycling ».

### 3 COMPARAISON DES PERFORMANCES DU CAP

Le CAP est une poudre noire très fine. Les différents produits ne peuvent être différenciés visuellement les uns des autres ce qui complique la sélection.

Une exigence importante posée envers le CAP est un taux d'épuration des MP élevé dans les eaux usées. Celui-ci ne peut pas, à l'heure actuelle, être déterminé avec l'un des paramètres courants du CAP [6–8].

#### 3.1 Tests par agitation

Dans la pratique, des essais par agitation ou vibration dans des béciers avec différents produits de CAP et à différents dosages ont fait leurs preuves pour définir le rendement et procéder à une présélection (Fig. 3).



Fig. 3 Comparaison de différents échantillons de CAP à l'aide d'essais par agitation

Lors des essais par agitation, un échantillon de l'effluent d'une STEP (c'est-à-dire le futur affluent de l'étape CAP) est analysé. Si le traitement biologique devait être fortement modifié lors de travaux au niveau de la STEP, par exemple par la mise en place d'une nitrification complète, la réalisation de ces tests avant la réalisation du projet ne donnera pas de résultats significatifs. Une suspension de CAP est ajoutée à l'échantillon et mélangée pendant une période donnée. Des échantillons sont prélevés pendant ou après l'essai et font l'objet d'analyses MP, du COD et de l'absorbance à une longueur d'onde de 254 nm. Cette dernière est également appelée coefficient spectral d'absorption  $CAS_{254}$  et fournit de précieuses informations sur la capacité potentielle du CA à éliminer les MP [6, 12, 13]. Le  $CAS_{254}$  peut être déterminé avec des photomètres qui effectuent des mesures dans la plage de l'ultraviolet. Le COD peut également être mesuré après la filtration de l'échantillon à la STEP. L'analyse des MP est plus complexe et coûteuse.

Toutefois, pour effectuer une première sélection des CAP, la détermination de l'élimination des MP n'est pas nécessaire. Les résultats de la diminution de l'absorbance UV ( $\Delta CAS_{254}$ ) et de la réduction du COD à certains dosages permettent déjà d'exclure certains CAP. Il est par ailleurs possible d'estimer les quantités annuelles requises. La deuxième série de tests ne comprend plus que quelques produits de CAP, trois à cinq, qui sont analysés de façon plus détaillée (analyses MP supplémentaires). Ces produits de CAP sont commandés de manière ciblée et selon la quantité estimée dans le cadre d'un appel d'offres. Cela permet par ailleurs d'obtenir des informations sur de possibles produits alternatifs en cas de pénuries d'approvisionnement.

Les essais par agitation peuvent être réalisés par le personnel de laboratoire pour les STEP de grande taille. Les STEP de petite et moyenne taille doivent faire appel à des laboratoires reconnus pour ce type de tests. Les « Instructions pour la réalisation de tests par agitation avec du charbon actif en poudre » [14], comprennent un descriptif destiné aux exploitants et aux laboratoires pour réaliser ces essais par agitation en laboratoire. Elles pourront également être utilisées pour contrôler la qualité des différentes livraisons de CAP pendant l'exploitation (voir chap. « Exploitation »).

Pour réaliser ces tests, il est nécessaire de disposer d'échantillons de CAP provenant des différents fabricants. Ils serviront également d'échantillons de référence après la livraison de lots plus importants. Il convient donc de demander au moins 100 g aux fabricants. La brochure du Centre de Compétences sur les micropolluants de Rhénanie-du-Nord-Westphalie [15] et [cette liste](#) fournissent un aperçu des fournisseurs potentiels de CA.

### **3.2 Influence de la matrice des eaux usées**

Lors de la détermination du dosage nécessaire, il convient de tenir compte du fait que le CA n'adsorbe pas seulement les MP, mais également d'autres substances organiques dissoutes provenant de la charge organique de fond. Cette dernière est également appelée « matrice des eaux usées » et entre en concurrence avec les MP pour la surface d'adsorption disponible sur le CA. Cette matrice est influencée par le bassin versant, la part et la composition des rejets industriels, ainsi que par le traitement mécanique et biologique de la STEP. Les MP font partie de la charge organique dissoute. Il est important de connaître la concentration des substances organiques dans les eaux usées car cela permet de faire une première estimation de la quantité de CAP nécessaire. Pour ce faire, il est possible de recourir aux paramètres COD (carbone organique dissous) et CAS<sub>254</sub>. La DCO (demande chimique en oxygène) dissoute fournit également des indications, car elle permet d'estimer le COD. Ainsi, env. 1,5 mg CAP/mg COD est actuellement utilisé à la STEP de Thunersee, ce qui correspond à 0,5 mg CAP/mg DCO dissous. Le rapport entre le CAS<sub>254</sub> et le COD varie en fonction de la matrice d'eau usée.

Dans la mesure où le COD est plus élevé que la concentration de MP dans les eaux usées épurées, le COD a une influence dominante sur la charge du charbon actif et sa consommation. Des teneurs élevées en COD dans les eaux usées provoquent généralement une consommation spécifique de CA plus élevée.

### **3.3 Unités utilisées pour définir la consommation de CAP**

L'unité de dosage de CAP joue un rôle central pour pouvoir comparer la consommation de CAP pour différentes eaux usées. La dose spécifique est souvent indiquée en mg CAP/l. Si cette indication permet d'évaluer les besoins globaux d'une station d'épuration par rapport

au débit entrant de la STEP, elle ne permet pas de comparer la consommation spécifique pour différentes eaux usées différentes [13].

Il serait donc pertinent de toujours indiquer la dose en mg CAP/mg COD. Cela permet de fournir des indications sur le taux d'épuration des CA utilisés en comparant directement différentes eaux usées. Des estimations des doses possibles de CAP en fonction des groupes de substances à éliminer sont fournies dans [3] en gCAP/gCOD. De nombreuses études et des essais pilotes ont montré qu'une dose de 1 à 2 mg CAP/mg COD est généralement suffisante pour éliminer un large spectre de MP [3, 13]. La dose effectivement nécessaire dépend par ailleurs du procédé utilisé.

Il serait également souhaitable d'indiquer la consommation de CAP spécifique (mg CAP/l) par rapport au  $CAS_{254}$  des eaux usées (E/m) [13]. Au cours du traitement au CA, le COD (Fig. 4A) mais aussi le  $CAS_{254}$  diminuent car des composés organiques carbonés à liaisons multiples, générant de l'absorbance, se fixent sur le CA. Le  $\Delta CAS_{254}$  d'une eau usée corrèle généralement très bien avec la diminution des MP [16], ce que confirme la Figure 4B.

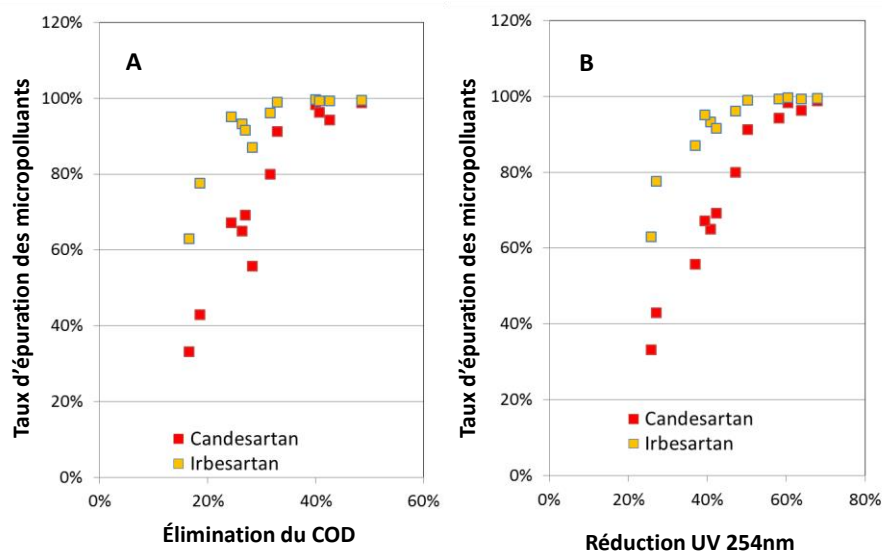


Fig. 4 Élimination des deux substances candésartan et irbésartan en fonction de la réduction du COD (A) et  $CAS_{254}$  (B) lors de l'utilisation de différents produits CAP et d'une matrice des eaux usées (données de [13, 17]).

## 4 ÉVALUATION DU CAP APPROPRIÉ

### 4.1 Facteurs d'influence

Plusieurs facteurs jouent un rôle dans le choix du CAP optimal pour une eau usée spécifique (Fig. 5). Les paragraphes suivants traitent de ces questions. L'influence des propriétés physiques du CAP ayant déjà été expliquée dans le sous-chapitre «Propriétés du charbon actif».

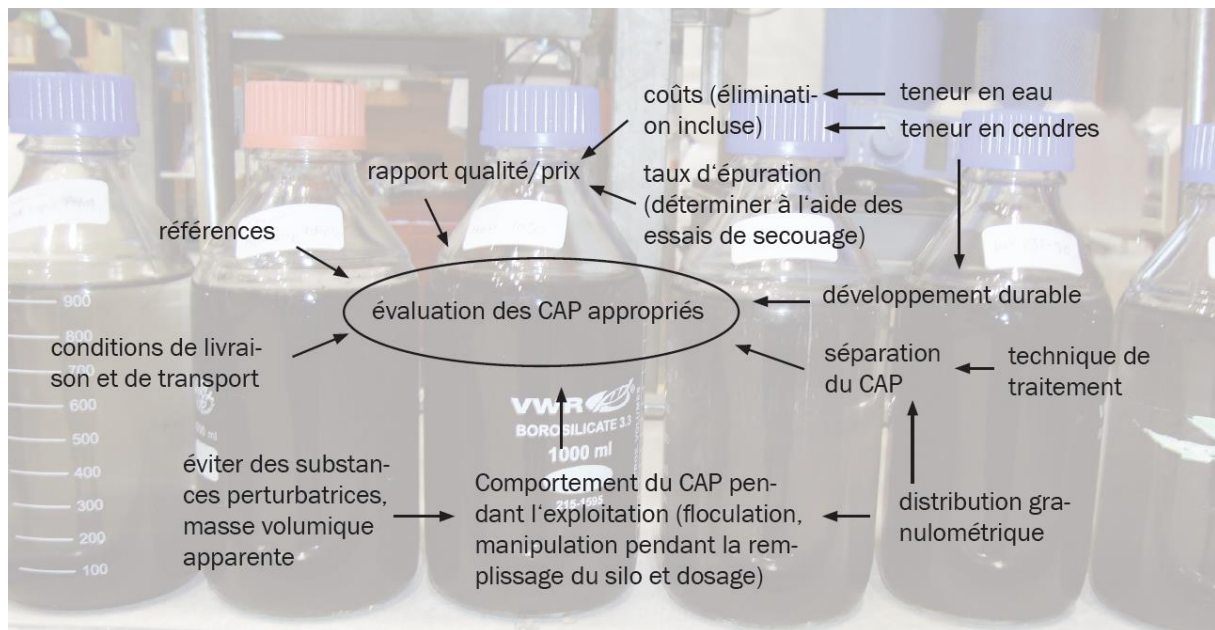


Fig. 5 Facteurs d'influence possibles dans l'évaluation des CAP appropriés

## Coûts

Les coûts sont un critère important dans le choix du CAP. Lors de l'appel d'offres pour le CAP, l'objectif principal est de trouver celui présentant le meilleur rapport qualité/prix pour les eaux usées concernées (p. ex. prix en francs par MP éliminé). Pour ce faire, le taux d'épuration, les coûts de l'élimination du CAP, la teneur en eau et la teneur en cendres doivent être pris en considération (v. « Évaluation des offres »).

## Taux d'épuration

Comme évoqué précédemment, les essais par agitation conviennent à la détermination du taux d'épuration d'un CAP spécifique. En raison de la spécificité de la matrice des eaux usées d'une STEP, différents CAP (appropriés pour l'élimination des micropolluants) peuvent présenter des taux d'épuration différents. Des tests en batch ont montré que l'élimination de certains MP peut varier pour six CAP différents entre 55 et 90% (COD) et 85 à 100% (réduction UV 254 nm) pour une même eau usée (Fig. 6). Afin de pouvoir évaluer les rendements d'élimination des différents types de CAP, la dose spécifique choisie ne doit pas être trop élevée, car les différences s'amenuisent avec l'augmentation de la dose. Si l'on choisit des produits bon marché ayant un rendement d'épuration moins élevé et nécessitant donc un dosage plus élevé, cela implique des coûts supplémentaires de transport, de dosage et d'élimination du CAP.

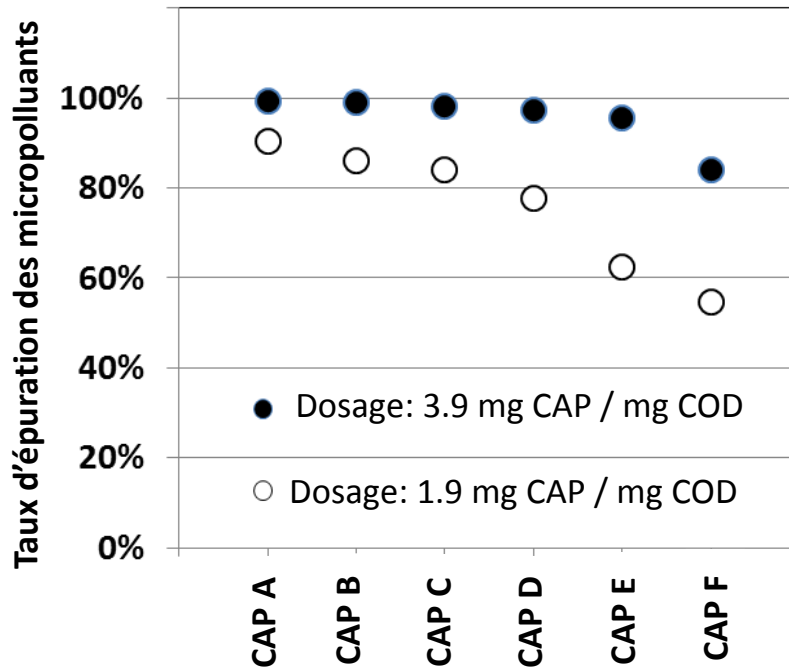


Fig. 6 Comparaison du rendement d'élimination de différents produits de CAP (CAP A à CAP F). L'élimination moyenne des micropolluants diclofénac, candésartan et irbésartan qui adsorbent moins facilement au charbon actif, est indiquée pour chaque charbon. Dans ces essais, deux dosages ont été testés pour une même eau usée. (données de [13, 17])

Le rendement d'épuration d'une étape MP à l'échelle industrielle est généralement meilleur que celui obtenu lors de l'essai par agitation. Cela est notamment dû au fait que l'essai par agitation ne peut pas reproduire exactement le procédé mis en place dans les STEP. Lors de l'essai en laboratoire, une petite quantité de CAP frais est mise en contact avec les eaux usées pendant une durée allant de plusieurs heures à plusieurs jours. En revanche, lors d'une application à l'échelle industrielle, les eaux usées sont mises en contact avec une grande quantité de CAP présentant des âges et des états de charge différents pendant une durée relativement courte (15 à 30 minutes). Toutefois, la comparaison avec la pratique montre que les essais par agitation constituent une méthode appropriée à l'évaluation du CAP. Cela est visible dans la Figure 7 qui compare l'élimination des MP lors de l'étape CAP à l'échelle industrielle à la STEP de Thunersee avec les résultats obtenus lors des essais par agitation. La transférabilité des résultats des essais par agitation à une application à l'échelle industrielle est également visible dans [18].

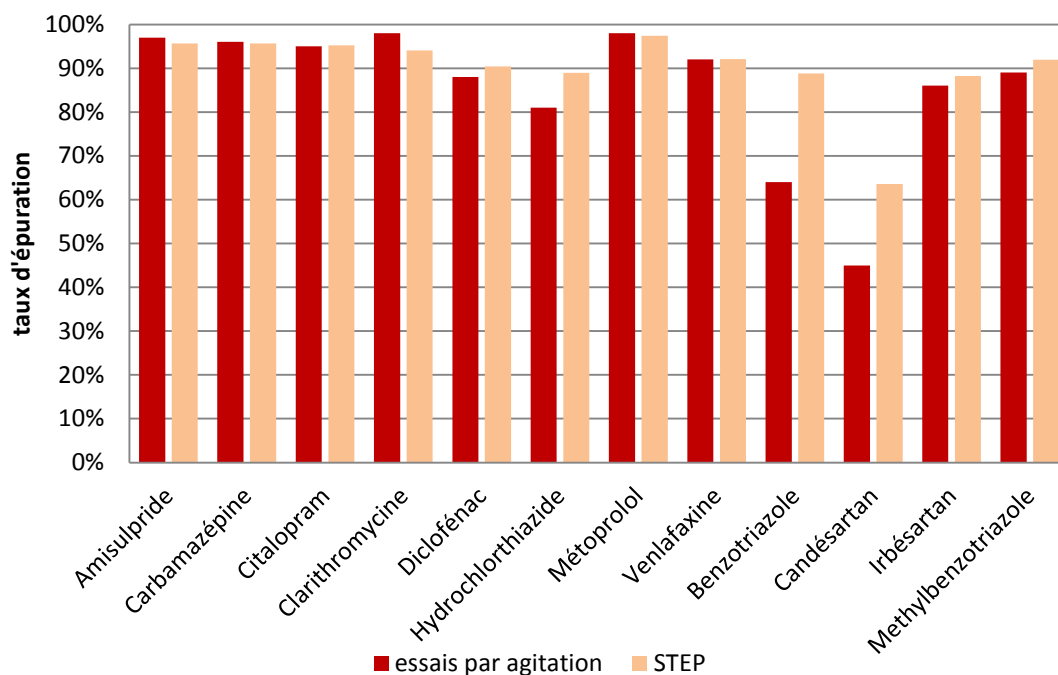


Fig. 7 Comparaison de l'élimination des micropolluants de l'installation de traitement par CAP à l'échelle industrielle de la STEP de Thunersee avec des essais par agitation en laboratoire. La valeur moyenne de sept échantillons composites de 48 heures est indiquée (dosage d'environ 8-10 mg CAP/l; 2 CAP différents utilisés en parallèle sur les deux lignes de traitement; lieu de prélèvement: entrée de la STEP et sortie de la filtration commune). Les deux mêmes produits CAP ont été utilisés dans l'essai par agitation (dosage d'environ 10 mg CAP/l; prélèvement après 24 heures). (Source : B. Bangerter, STEP de Thunersee)

## Procédés, séparation du CAP et comportement durant l'exploitation

Il existe actuellement une multitude de procédés différents utilisant du CAP dans les STEP [19–21]. Ces procédés peuvent influencer le choix d'un CAP approprié. Le procédé de séparation détermine quelles granulométries de CAP peuvent être retenues. Une membrane permet, par exemple, d'utiliser du CAP ultrafin, qui réagit plus rapidement avec les MP. Il est par ailleurs important que le CAP réagisse le plus complètement possible avec les produits chimiques tels que le coagulant et le floculant, pour garantir une bonne rétention du CAP lors de la sédimentation et de la filtration. Les pertes de CAP doivent toujours être minimales.

L'influence du CAP sur certains paramètres d'exploitation de l'installation, tels que la floculation et la turbidité, ne peut être déterminée que lors d'un essai pilote ou lors de l'exploitation d'une installation à échelle industrielle. Cela vaut également pour le comportement du CAP au niveau du poste de dosage et lors du remplissage du silo influençant énormément la charge de travail du personnel d'exploitation.

## Développement durable

Actuellement, une grande partie du CA est produite dans la zone asiatique, en Australie et aux États-Unis [2, 3]. Le processus de fabrication nécessite beaucoup d'énergie et génère des émissions qui représentent plus de la moitié de l'empreinte CO<sub>2</sub> totale des applications au charbon actif dans les STEP [22]. Comparé à l'ozonation, un procédé alternatif d'élimination des MP, le potentiel de réchauffement global du CAP est généralement plus élevé [22], notamment dans le cas du mix électrique suisse relativement neutre en CO<sub>2</sub>. Si une STEP souhaite utiliser un CAP durable, elle a deux possibilités: opter pour une matière première renouvelable (Encadré 3) ou un produit possédant une part élevée de charbon actif réactivé.

L'aperçu de l'empreinte CO<sub>2</sub> en fonction de la matière première utilisée et avec une distinction entre charbon frais et charbon réactivé, présenté à la Figure 8, confirme ce constat [2]. Comparée aux produits réactivés, la production de charbon frais implique une empreinte CO<sub>2</sub> env. cinq fois supérieure. La part de charbon réactivé dans le produit est donc un paramètre important pour déterminer l'influence environnementale. Malheureusement, ces données ne sont pas toujours communiquées de manière transparente par les fabricants.

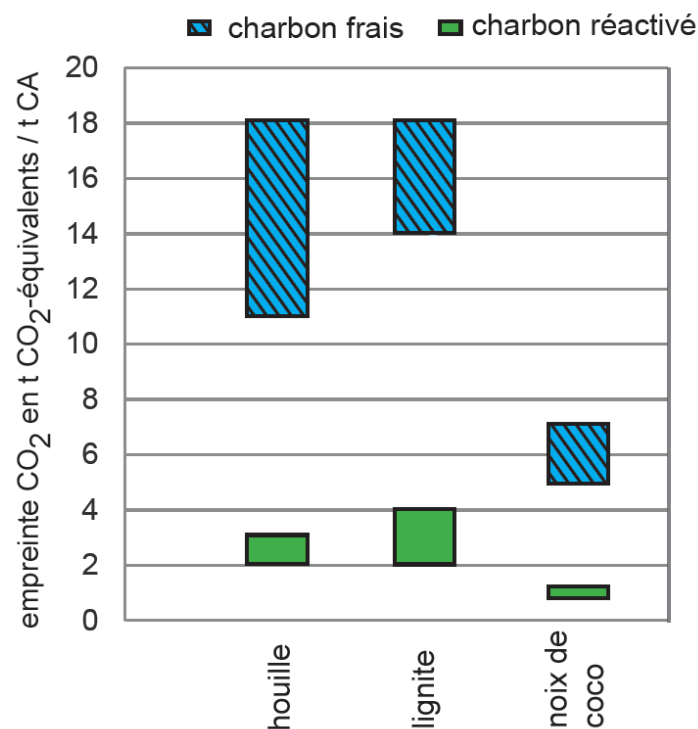


Fig. 8 Empreinte CO<sub>2</sub> du charbon actif frais et réactivé pour diverses matières premières de départ; enquête anonyme auprès des fabricants de charbon actif, y compris la consommation électrique et la consommation de vapeur pendant le processus de fabrication, émissions atmosphériques dues aux pertes de matières premières fossiles et transport, sans élimination; facteurs d'évaluation provenant de la base de données Ecoinvent Life Cycle Assessment [23].

Les STEP qui souhaitent utiliser du charbon frais durable doivent généralement accepter de payer des prix plus élevés pour une matière première renouvelable. Lors d'une évaluation complète des impacts environnementaux, les particularités locales liées à la fabrication du charbon actif peuvent également jouer un rôle important dans certains cas.

Le développement durable englobe par ailleurs des aspects sociaux tels que des conditions de travail équitables et le fait de ne pas recourir au travail des enfants. Dans la plupart des cas, il est difficile de vérifier ces aspects pour un produit.

### **3) Projet « Empyrion »**

Un CAP produit en Suisse à partir de déchets biogènes serait une option durable: des ressources renouvelables seraient ainsi utilisées et les acheminements seraient réduits au minimum. Les conditions sociales de la fabrication du CAP seraient également plus faciles à vérifier. Dans le cadre du projet «Empyrion» – mené par l'agroscope, l'institut Ithaka et l'eawag – des chercheurs ont produit du CAP en laboratoire à partir de déchets biogènes ligneux provenant de Suisse et pouvant rivaliser avec les produits disponibles sur le marché en matière de rendement d'épuration. L'article de Hagemann et al. [24] fournit de plus amples informations à ce sujet. Des projets consécutifs se focaliseront sur la transposition de ce concept à des applications à l'échelle industrielle.

## **Conditions de livraison et de transport**

Pour un bon déroulement de l'exploitation d'une étape CAP, il est important que le délai de livraison ne soit pas trop long et que la quantité convenue puisse être livrée. Toute contamination doit par ailleurs être évitée au moment du chargement et du transport.

## **Références**

De nombreux CAP ont déjà fait leurs preuves dans d'autres STEP. Des informations plus précises peuvent être obtenues auprès du groupe d'échange d'expériences suisse «Charbon actif» ou du groupe d'échange entre exploitants «Composés traces dans le Bade-Wurtemberg». La plateforme «Techniques de traitement des micropolluants» vous fournira volontiers les contacts nécessaires.

## **4.2 Évaluation des offres**

Lors de l'évaluation des offres, les facteurs susmentionnés peuvent être intégrés dans les critères d'évaluation. Mais ils devraient déjà être communiqués de manière transparente dans les documents de l'appel d'offres.

Dans les appels d'offres publics, les coûts constituent le critère le plus important. Selon les directives cantonales, ils doivent être pondérés à au moins 30–50%, un taux de 50% étant

généralement la norme. Il est donc important que les coûts d'élimination du CAP soient intégrés dans la comparaison des coûts. Le choix de la formule de prix a également une très grande influence. Pour faire un choix pertinent, il est intéressant d'envisager différentes situations lors de l'élaboration des documents de soumission. Dans certains cantons, la formule de prix est plus ou moins définie.

Le maître d'ouvrage peut intégrer des exigences supplémentaires en matière de CAP dans les critères d'attribution ou les spécifications techniques, comme décrit dans les paragraphes suivants.

Le document [4] expose les résultats d'un sondage effectué par le Centre de compétences des composés traces du Bade-Wurtemberg (Koms) et le VSA auprès des exploitants d'étapes CAP. Différentes approches sont abordées, comme l'intégration du rendement d'épuration dans l'évaluation en plus du prix. Dans le cas d'un appel d'offres public, il serait envisageable de mettre le CAP au concours de manière sélective. Le critère de sélection pourrait par exemple être une exigence minimale envers le  $\Delta CAS_{254}$ .

Il est également pertinent de baser le prix sur la teneur garantie en eau, afin de prendre en compte de manière appropriée la fluctuation de celle-ci. En effet, les expériences réalisées à la STEP de Thunersee montrent que la teneur en eau de l'échantillon de CAP n'est pas forcément représentative des livraisons ultérieures.

Dans son appel d'offres, la STEP de Thunersee a exigé dans les spécifications techniques que le fournisseur garantisse l'absence d'impuretés ou utilise un tamis (doté de mailles de 5 mm, par exemple) entre le camion et la conduite de remplissage lors de l'injection du CAP.

Des indications concernant la livraison et les références peuvent également être intégrées dans les critères d'attribution. Des indications sur la matière première utilisée et la part de produit réactivé et donc l'empreinte CO<sub>2</sub> peuvent également être utilisées pour évaluer l'influence environnementale, dans la mesure où elles reposent sur une base comparable (p. ex. Fig. 8). Chaque STEP doit décider individuellement quelle importance et par conséquent quelle pondération donner au critère de développement durable. Le VSA et l'eawag saluent une prise en compte adéquate de ce critère compte tenu de l'objectif fixé pour le traitement par CAP dans les STEP qui est de protéger les eaux, et donc de protéger l'environnement.

Lors de l'appel d'offres pour le CAP, il est difficile d'intégrer les critères sociaux car il n'y a pas de lien suffisant entre les conditions sociales garanties lors de la production et le produit en lui-même, comme c'est généralement le cas dans la plupart des marchés publics [25]. Selon [26], il est toutefois possible d'exiger le respect des conventions fondamentales de l'Organisation internationale du travail (OIT) comme condition de participation.

Jusqu'à présent, les exploitants ont soit lancé un appel d'offres à chaque livraison soit souscrit un contrat de livraison pour une durée d'un an. Cela dépend de leur consommation de CAP [4]. Selon le volume commandé, l'attribution de livraisons individuelles n'est pas

autorisée et un contrat annuel ou pluriannuel doit être souscrit. Afin de réduire autant que possible la charge de travail engendrée par l'appel d'offres, les exploitants peuvent inclure une possibilité de prolongation dans le contrat annuel.

## **5 EXPLOITATION – CONTRÔLE DU CAP LIVRÉ**

Dès que l'exploitant a choisi un produit, il devra alors mettre l'accent sur le contrôle qualité des différentes livraisons effectuées.

### **5.1 Observations des exploitants de STEP concernant la qualité du CAP**

Dans le Bade-Wurtemberg, de nombreuses STEP utilisent du CAP depuis plusieurs années déjà. Leurs expériences montrent qu'il est pertinent de procéder à un contrôle qualité des différentes livraisons de CAP. En effet, ils ont parfois observé des indices laissant penser que le CAP était de qualité variable. En voici quelques exemples: augmentation de la teneur en eau, différences visuelles au niveau de la couleur et rendements d'épuration variables. Des pénuries de livraison sont également survenues. Parfois, des quantités moins élevées que convenu étaient livrées. Dans certains cas, des substances perturbatrices présentes dans le CAP livré ont endommagé l'installation de dosage.

La durée de remplissage peut également varier de manière significative en fonction du CAP. Des temps d'attente sont parfois nécessaires entre le remplissage et le tassement du CAP dans le silo pour pouvoir introduire dans le silo la quantité de CAP souhaitée. Une masse volumique tassée élevée du CAP est avantageuse, car elle permet une meilleure utilisation du volume de stockage disponible.

### **5.2 Possibilités de contrôle qualité**

Le sondage sur les expériences d'exploitation faites avec le CAP [4] permet de formuler les recommandations suivantes:

La teneur en eau doit être contrôlée dans tous les cas pour vérifier la qualité du CAP. Pour ce faire, la valeur doit être déterminée à 150 ° (conformément la norme DIN EN 12902) et non pas à 105 °C comme pour la détermination de la teneur en matière sèche des boues activées. Par ailleurs, la mesure de la teneur en cendres ou des résidus de calcination est utile car elle indique si le produit est un charbon frais (5– 10%) ou réactivé (< 15%). Dans ce cas, il convient d'appliquer la norme DIN EN 12902 [4, 9].

La principale mesure que nous recommandons est le contrôle du rendement d'épuration du CAP livré à l'aide d'un nouvel essai par agitation comparé au rendement de l'échantillon de CAP utilisé lors de l'essai par agitation initial. Cette comparaison demande du temps et ne peut pas être effectuée avant le déchargement du CAP. Il est donc généralement difficile de restituer du CAP de mauvaise qualité.

Certains exploitants du Bade-Wurtemberg ont donc convenu par voie contractuelle des mesures de compensation pour le cas où les valeurs garanties ne seraient pas respectées. De cette manière, les résultats obtenus lors des essais par agitation peuvent entraîner des conséquences. Par souci d'équité, des rendements d'épuration du CAP plus élevés seraient également rémunérés [4].

Les exploitants de la STEP de Herisau ont prélevé des échantillons de contrôle à chaque livraison et les ont comparés à l'échantillon initial à l'aide d'un essai par agitation en collaboration avec l'eawag. Dans l'exemple exposé dans la Figure 9, la qualité des différents lots livrés est très similaire. Aucune valeur aberrante concernant la réduction du COD ou du  $\Delta CAS_{254}$  n'a été constatée.

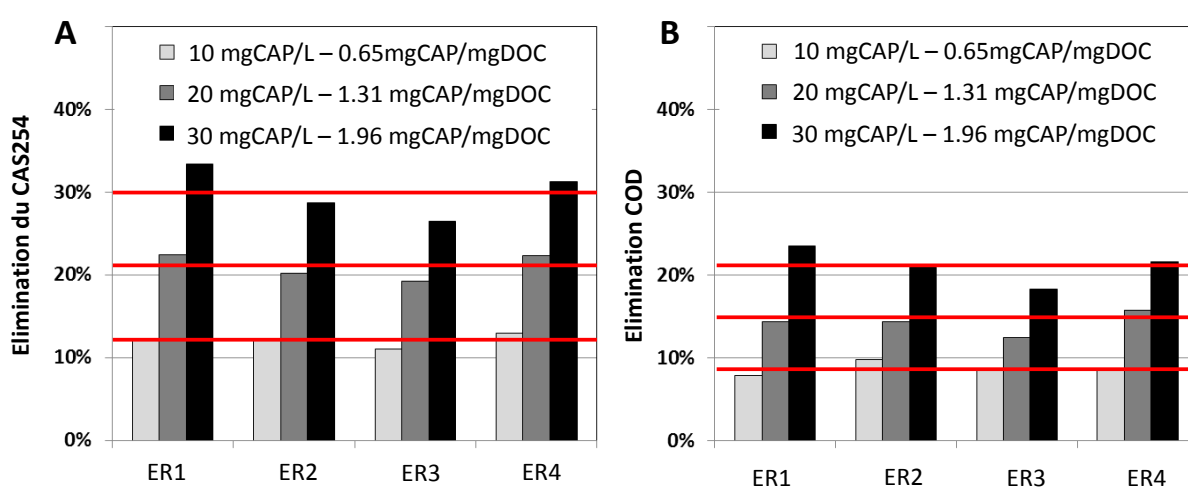


Fig. 9 Comparaison du taux d'élimination pour différents échantillons de contrôle (EC) provenant de lots de livraison de CAP à la STEP de Herisau. Les lignes rouges indiquent la moyenne des tests. Les valeurs de  $\Delta CAS_{254}$  (A) et de la réduction de la COD (B) sont heureusement dans le même ordre de grandeur pour toutes les livraisons. La matrice des eaux usées est comparable pour toutes les expériences. (données de [13])

Pour les essais par agitation, un échantillon composite représentatif du nouveau CAP livré est nécessaire. Selon [4], l'installation d'un piquage à partir de la conduite de remplissage a fait ses preuves. Il serait également possible de prendre un échantillon de CAP avec un préleveur directement dans le camion ou au niveau de la vanne du camion.

## 6 BILAN

Le CAP permet d'éliminer les MP en toute fiabilité. Pour déterminer le rapport qualité/prix d'un produit, il est primordial d'estimer la quantité de CAP nécessaire pour atteindre le rendement d'épuration pour une eau usée spécifique. Par ailleurs, d'autres exigences telles que l'élimination du COD ou de substances isolées peuvent également jouer un rôle selon les STEP. Cela vaut donc la peine d'effectuer un essai par agitation avec les eaux usées concernées afin de déterminer le CAP optimal. Ce test fournira des informations sur le

rendement d'élimination et donc également sur le dosage nécessaire, les coûts d'exploitation effectifs et les impacts environnementaux. Il est difficile de choisir un produit, lorsque la composition des eaux usées varie fortement en raison de déversements importants.

D'autres facteurs peuvent influencer la sélection du CAP tels que le prix, la rétention de CAP, le développement durable, les références, les conditions de livraison et la manipulation du CAP. Lors de l'appel d'offres, ces critères doivent être communiqués de manière transparente et claire.

Les observations faites par les exploitants de STEP dans le Bade-Wurtemberg montrent que la qualité d'un CAP peut varier d'une livraison à l'autre. Ils ont développé, notamment avec le soutien du KomS, des méthodes permettant de simplifier le contrôle qualité sur site et d'en réduire les coûts. Dans tous les cas, il est recommandé de prélever des échantillons de contrôle à chaque nouvelle livraison afin de vérifier les paramètres de qualité convenus par contrat, tels que la teneur en eau ou en cendres et, le cas échéant, de mesurer le taux d'épuration. Les exploitants de STEP suisses peuvent s'appuyer sur ces expériences grâce à des réseaux d'échange d'expériences désormais bien établis.

## **7 PERSPECTIVES**

Même s'il existe déjà des méthodes opérationnelles pour le maniement au quotidien du CAP, de nombreuses questions demeurent. Faut-il, par exemple, une description plus détaillée des exigences posées envers le CAP, peut-être même une sorte de certification analogue à celle du charbon végétal [27]? Quels sont les critères importants pour les exploitants de STEP lors de la sélection d'un CAP? Quelle importance les décideurs attachent-ils à un CAP issu de matières premières renouvelables? Ou seul le prix compte-t-il?

Ces questions et d'autres feront partie intégrante de discussions entre exploitants de STEP, fournisseurs, ingénieurs et chercheurs. La première réunion du groupe d'échange d'expériences «Charbon actif» qui s'est tenue en juin 2018, pose les bases d'un échange entre exploitants et ingénieurs en Suisse. Des réunions annuelles sont prévues durant lesquelles un espace sera prévu pour des exposés techniques de fabricants. Les personnes intéressées peuvent s'adresser à la plateforme «Techniques de traitement des micropolluants». Le réseau d'exploitants doit garantir un échange actif de connaissances.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dominguez, D.; Schärer, M.; Zimmermann-Steffens, S.; Bleny, H (2016): «Reduktion der Spurenstoffe in Gewässern», *Aqua & Gas* 1/16: 16–23
- [2] Groupe de travail DWA KA 8.6 (2016): «Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung – Arbeitsbericht», *revue Korrespondenz Abwasser, Abfall*, pp. 1062–1067
- [3] Groupe de travail DWA KA 8.6 (2019): «Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffelimination – Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte», *brochure DWA T1/19*
- [4] Rössler, A.; Meier, A. (2019): «Praxiserfahrungen zum Einkauf und zur Qualitätssicherung von Pulveraktivkohle bei der kommunalen Abwasserbehandlung», *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, en cours d'impression
- [5] Benstöm, F. et al. (2016): «Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen – Ein Review halb- und grosstechnischer Untersuchungen – Teil 1: Veranlassung, Zielsetzung und Grundlagen», *revue Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Nr. 3
- [6] Zietzschmann, F. et al. (2014): «Estimating organic micro-pollutant removal potential of activated carbons using UV absorption and carbon characteristics», *Water Research* 56, pp. 48–55
- [7] Benstöm, F. (2017): «Granulierte Aktivkohle zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser – Dissertation», *Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen*
- [8] Hoffmann, G. et al. (2017): «Optimierter Einsatz von Pulveraktivkohle und Ultrafiltration als 4. Reinigungsstufe (UF/PAK 4.0)», in *Aachener Tagung Wassertechnologie 24.–25.10.2017, Aachen*
- [9] Réglementation DVGW, fiche de travail W239 (A) (2011): «Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle», *Bonn*
- [10] Zwickelpflug, B. et al. (2010): «Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Schlussbericht», *Eawag / www.micropoll.ch, Dübendorf*
- [11] IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry, «<https://iupac.org>» [Online]

- [12] Altmann, J.; Massa, L.; Sperlich, A.; Gnirss, R. (2016): «UV254 absorbance as real-time monitoring and control parameter for micropollutant removal in advanced water treatment with powdered activated carbon», *Water Research*, pp. 240–245
- [13] Boehler, M. et al.: «Auswahl, Leistungsfähigkeit und Qualität verschiedener Pulveraktivkohlen (PAK) zur Elimination von Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser», in Bearbeitung
- [14] Plateforme VSA «Techniques de traitement des micropolluants», Eawag: «Anleitung für Schüttelversuche mit Pulveraktivkohle – Elimination von Mikroverunreinigungen auf Kläranlagen», Dübendorf,  
[https://www.micropoll.ch/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Dokumente/01\\_Berichte/02\\_Technische\\_Verfahren/03\\_Aktivkohle/190620\\_Anleitung\\_Sch%C3%BCttelversuche-final.pdf](https://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/01_Berichte/02_Technische_Verfahren/03_Aktivkohle/190620_Anleitung_Sch%C3%BCttelversuche-final.pdf)
- [15] NRW, Centre de Compétences sur les micropolluants: «Einsatz von Aktivkohle zur Wasser-/Abwasserbehandlung – Übersicht der Aktivkohlehersteller und Lieferanten sowie Anlagenbauer von Dosiertechnik», <https://www.masterplan-wasser.nrw.de/downloads/broschuere-aktivkohle/>, Stand Mai 2018
- [16] Wunderlin, P. et al. (2017): « Concepts de surveillance de l'efficacité d'épuration des étapes de traitement supplémentaires permettant l'élimination des micropolluants », [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch), Dübendorf
- [17] Böhler, M.; McArdell, C.S. (2018): «Pilotversuche zur erweiterten Abwasserbehandlung mit granulierter Aktivkohle (GAK) und kombiniert mit Teil-ozonung (O3/GAK) auf der ARA Glarnerland. Erster Zwischenbericht.», Eawag, Dübendorf
- [18] Zietzschmann, F. et al. (2019): «Fast empirical lab method for performance projections of large-scale powdered activated carbon re-circulation plants», *Chemosphere*, Bd. 215, pp. 563–573
- [19] Wunderlin, P.; Meier, A.; Grelot, J. (2017): «Élimination des micropolluants dans les STEP - État actuel des procédés et évolutions futures», *Aqua & Gas* 11/17: 60–70
- [20] Boehler, M. et al. (2012): «Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon», *Water Science and Technology*, Bd. 66, Nr. 10, pp. 2115–2121
- [21] Metzger, S. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. Dissertation TU Berlin, München: Oldenbourg Industrieverlag
- [22] Mutz, D.; Remy, C.; Miehe, U.; Sperlich, A. (2017): «Einfluss von Ozonung oder Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Entfernung organischer Spurenstoffe auf den Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Fussabdruck einer Kläranlage», *revue Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Bd. 4, pp. 310–318
- [23] Swiss Center for Life Cycle Inventories (2014): «Ecoinvent data v3.1, ecoinvent reports No. 1–26», [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org), Dübendorf

- [24] Hagemann, N. et. al. (2019): «Aktivkohle – Made in Switzerland!», *Aqua & Gas* 1/19: 32-38
- [25] <https://oeffentlichebeschaffung.kompass-nachhaltigkeit.ch/p.Rahmenbedingungen/ausschreibung/zuschlagskriterien>.
- [26] CIEM – Communauté d'intérêt écologie et marché suisse (2014): «Marchés publics – Guide pour l'intégration de critères écologiques, sociaux et économiques», CIEM, Gerlafingen
- [27] European Biochar Foundation EBC Arbaz, Switzerland (2012): «European Biochar Certificate – Richtlinien für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle», DOI: 10.13140/RG.2.1.4658.7043, Nr. <http://www.european-biochar.org/en/download>. Version 7.5