

Plateforme

«Techniques de traitement des micropolluants»

Eawag :

L'Institut de Recherche de l'Eau du Domaine des EPF

## Fiche d'information – État actuel

### Filters à charbon actif en grains (CAG) rétrolavés discontinuellement pour l'élimination des composés traces organiques dans les eaux usées communales

Ce document résumait initialement l'état des connaissances sur la base des résultats obtenus lors du workshop du 9.12.19 à l'Eawag concernant la filtration sur charbon actif en grains (Böhler et al. 2020). La première mise à jour a été effectuée en septembre 2023. *Les principales modifications techniques sont signalées en rouge.* Cette fiche d'information pourra être complétée, si besoin, afin de prendre en compte l'évolution des connaissances. Les auteurs ne prétendent pas à l'exhaustivité.

Organisation du workshop : Böhler M., Joss A., McArdell C. (Eawag), Brander A. (VSA)<sup>1</sup>

Participants au workshop :

- Bureaux de conseil et de planification : Alt K. (Hydro-Ingenieure, D), Baggenstos M. (Hunziker, CH), Benstöm F. (atd GmbH, D), Bitterwolf S. (Kuster und Hager, CH), Fux C. (TBF, CH), Le Goaziou Y. (BG, CH), Lehmann P. (Triform, CH), Löwenberg J. (CSD, CH), Salzgeber D. (Holinger, CH), Thomann M. (anc. Holinger, CH ; act. FHNW), Schölzel S. (Schölzel Consulting, pour la première mise à jour)
- Exploitants de STEP : Biermann K. (STEP de Glaris, CH), Preisig W. (STEP REAL, CH)
- Recherche : Böhler M. (Eawag, CH), Fundneider T. (TU Darmstadt, D), Hernandez A. (Eawag, CH), Joss A. (Eawag, CH), McArdell C. (Eawag, CH), Nahrstedt A. (IWW, D), Siegrist H. (anc. Eawag, CH)
- Office fédéral de l'environnement : Dominguez D. (section Protection des eaux, CH)
- VSA : Abegglen C. (VSA, STEP de Werdhölzli, CH), Grelot J. (plateforme VSA, CH), Brander A. (plateforme VSA, CH)

#### Contexte

La filtration à lit profond sur charbon actif en grains (CAG) est un procédé visant à éliminer les composés organiques dissous des eaux polluées et peut également être utilisée dans les stations d'épuration (STEP) pour éliminer les composés traces organiques. Du point de vue technique, la filtration sur CAG est très similaire à la filtration sur sable.

Au cours des dernières années, d'importants essais pilotes ont été menés en Suisse, comme en témoignent

---

<sup>1</sup> Citation proposée :

Böhler M., Joss A., McArdell C., Brander A. (2023). Fiche d'information – État actuel, filters à CAG rétrolavés discontinuellement pour l'élimination des composés traces organiques dans les eaux usées communales. Document de synthèse suite au workshop du 9.12.2019 à l'Eawag avec la participation d'experts venus de Suisse et d'Allemagne, Eawag et VSA, Dübendorf. Deuxième version mise à jour du document de synthèse de 2020.

les études réalisées dans les STEP de Bülach et de Glaris (Böhler et al. 2020b, Böhler et al. 2022, Mc Ardell et al. 2020). Un certain nombre de projets à échelle industrielle avec du CAG sont en cours de planification (p. ex. à la STEP de Muri) ou déjà mis en service (dans les STEP de Moos et Altenrhein en combinaison avec une ozonation ; à la STEP de Glaris en combinaison avec du CAP). Par ailleurs, diverses filtrations sur CAG sont en service depuis plusieurs années en Allemagne et le nombre de filtrations sur CAG planifiées ne cesse d'augmenter. L'expérience dans ce domaine est donc amenée à se développer rapidement (Benstöm et al. 2016/2017, Fundneider et al. 2020/21).

L'intérêt croissant de la part des exploitants et des ingénieurs pour cette technologie s'explique par sa simplicité de mise en œuvre technique et sa rentabilité. Ces derniers ont besoin de recommandations pour le dimensionnement des filtres à CAG.

Dans ce contexte, des experts suisses et allemands issus de la pratique et de la recherche se sont réunis à l'Eawag lors d'un workshop, afin de rassembler les connaissances relatives au dimensionnement de filtres à CAG acquises lors des différents projets. Les principaux résultats de cette rencontre sont résumés dans le présent document.

Seule la filtration à lit profond sur CAG à **courant descendant** rétrolavée discontinuellement est traitée ici. D'autres procédés au CAG, comme les filtres à CAG rétrolavés continuellement ou le CAG en lit fluidisé, présentent des différences substantielles en matière de mise en œuvre technique et ne seront donc pas abordés ici.

### **Exigences légales, recommandations relatives au taux d'épuration et surveillance**

En Suisse, l'élimination des composés traces dans les STEP est fixée par la loi. En Allemagne, l'élimination des composés traces n'est soumise à aucune exigence légale, mais des recommandations sont formulées par les états de Rhénanie-du-Nord-Westphalie (NRW) et du Bade-Wurtemberg (BW). Le présent document se concentre sur les exigences légales appliquées dans les STEP suisses. Un taux d'épuration d'au moins 80 % des 12 substances de référence (ou une sélection de ces dernières) par rapport aux eaux usées brutes doit être respecté (pour des informations détaillées sur la procédure et le calcul du taux d'épuration, voir ce [lien](#)). C'est là une différence importante entre la législation suisse et les exigences allemandes.

Le taux d'épuration est déterminé à l'aide d'échantillons composites sur 48 h. Cependant, chaque année, un certain nombre de dépassements peuvent être admis en fonction de la taille de la STEP, conformément à l'annexe 3.1, ch. 42, OEaux. Par conséquent, les affirmations ci-dessous ne sont pas forcément transposables telles quelles à d'autres pays dont les exigences relatives à l'élimination des composés traces peuvent différer de la Suisse.

En Allemagne, un principe similaire est appliqué dans certains états. Le tableau 1 présente les substances de référence utilisées actuellement en Suisse pour le suivi de l'élimination des composés traces, mais aussi celles utilisées par les états de NRW et du BW. Les exigences relatives au suivi de l'élimination des composés traces sont propres à chaque état en Allemagne.

Tableau 1 : Substances de référence pour le contrôle du taux d'épuration des micropolluants (situation en 2019)

Groupe de substances	Suisse	Rhénanie-du-Nord-Westphalie	Bade-Wurtemberg
Substances médicamenteuses	Amisulpride°		
	Carbamazépine°	Carbamazépine	Carbamazépine
	Candésartan*		
	Citalopram°		
	Clarithromycine°	Clarithromycine	
	Diclofénac°	Diclofénac	Diclofénac
	Hydrochlorothiazide°		Hydrochlorothiazide
	Irbésartan*		Irbésartan
	Métoprolol°	Métoprolol	Métoprolol
		Sulfaméthoxazole	
	Venlafaxine°		
Agent anticorrosion	Benzotriazole*	Benzotriazole	Benzotriazole
	∑ 4+5-méthylbenzotriazole*		∑ 4+5- méthylbenzotriazole
Remarques	Classement des substances : ° « Très facilement éliminable » * « Facilement éliminable »	Brochure sur le dimensionnement du KOM-M.NRW : Guide pour la planification et le dimensionnement d'installations visant à éliminer les micropolluants, 2 <sup>e</sup> édition (2016)	« <u>Recommandations d'action</u> pour le contrôle comparatif et l'exploitation de procédés visant à éliminer les composés traces de manière ciblée » (2019)

### Dimensionnement des filtres à CAG

Le **temps de contact hydraulique du filtre** (dénomination anglaise : Empty Bed Contact Time, EBCT)<sup>2</sup> est la principale valeur de dimensionnement de la filtration sur CAG. Le temps de contact ne devrait pas descendre en dessous de 20 minutes lors de l'exploitation de (n-1) filtres, c'est-à-dire avec une cellule filtrante hors service (révision/réactivation/rétrolavage) et par débit maximal (temps de pluie).

La **hauteur du lit filtrant et les vitesses de filtration** sont d'autres paramètres importants. Ces deux valeurs sont étroitement liées entre elles. Les vitesses de filtration sont définies à partir des débits volumiques et de la surface filtrante choisie, et de ces vitesses de filtration résultent les temps de contact à travers le dimensionnement de la hauteur du lit filtrant ([voir procédure en annexe](#)). La hauteur du lit filtrant choisie devrait se situer entre 1,5 m et env. 2,5 m ([et jusqu'à 3 m dans de bonnes conditions](#)). Un filtre ayant une granulométrie de CAG fine et hétérogène aura tendance à développer une filtration de surface. Il est donc recommandé d'utiliser des surfaces filtrantes plus grandes avec des vitesses de filtration résultantes plus faibles et de faibles hauteurs de lit pour des eaux usées chargées en matières en suspension et des surfaces filtrantes plus petites avec des hauteurs de lit plus élevées pour des eaux usées peu chargées en matières en suspension. Il convient de trouver la combinaison optimale de hauteur de lit/hauteur de média, de surface filtrante résultante ainsi que de granulométrie (adaptée à la charge de matières en suspension). [Vous trouverez plus d'informations sur ce point en annexe](#). Une hauteur de lit filtrant élevée implique des ouvrages de grande taille et une planification spécifique des équipements électromécaniques. Du temps de contact et de la hauteur du lit filtrant résultent des vitesses de filtration comprises entre 4 et 8 m/h (pour n-1 cellules filtrantes). Un **nombre minimum de 4 cellules filtrantes** (incluant la cellule de réserve pour la réactivation et les révisions) permet une adaptation du fonctionnement de l'installation en fonction du débit entrant (mise en marche lors d'une augmentation de débit ou arrêt de cellules filtrantes lors d'une diminution de débit). La cellule de réserve doit être incluse au régime d'exploitation de manière à ce que toutes les cellules filtrantes soient en service à intervalles réguliers pour conserver une activité biologique élevée.

<sup>2</sup> Le **temps de contact hydraulique du filtre** (EBCT) est défini comme étant le volume du lit filtrant (surface de la cellule filtrante \* hauteur du lit filtrant) divisé par le débit entrant. Cela suppose que les filtres sont parcourus à une vitesse homogène. Le temps de contact effectif dans le lit est donc beaucoup plus faible, car le volume du CAG est fixé à zéro pour l'EBCT par souci de simplification.

Le dimensionnement des cellules filtrantes doit être adapté à la capacité de chargement des camions qui amènent ou évacuent le CAG. Ce faisant, il convient de noter que le CAG humide a un poids deux fois plus élevé que le CAG sec.

Les retours d'expériences actuels montrent que des **durées de vie** d'environ 20 000 à 30 000 volumes de lit<sup>3</sup> par cellule filtrante permettent de respecter un taux d'épuration de 80 % d'élimination sur l'ensemble du processus de filtration. Ceci implique un renouvellement du CAG échelonné dans le temps, c'est-à-dire que les cellules contenant du CAG « frais » présentent un taux d'élimination plus élevé, tandis que le taux d'élimination des cellules déjà fortement chargées est inférieur à 80 %. La durée de vie du CAG est largement influencée par la concentration en COD en entrée de filtration.

La **granulométrie** adéquate du CAG dépend de la concentration en MES de l'affluent et donc du traitement préalable (p. ex. utilisation après la filtration ou le traitement biologique), comme indiqué dans le tableau 2 (voir annexe pour plus de détails). En règle générale, il convient de viser une concentration en MES la plus faible possible. Pour un même type de CAG, une granulométrie plus fine présente une surface de grain plus élevée et un diamètre de grain plus faible, ce qui conduit à un meilleur échange de substances autour du grain et vers l'intérieur du grain et devrait donc permettre des temps de contact plus faibles. **Avec la granulométrie proposée pour des concentrations en MES  $\geq 10$  mg/l, il convient à l'inverse de tenir compte du fait que la capacité d'adsorption est plus faible qu'avec une granulométrie plus fine. La masse volumique apparente est plus élevée pour les types de CAG plus fins (voir tableau 2) compte tenu des plages de granulométrie (de la taille minimale à la taille maximale de grain) nettement plus larges choisies, ce qui signifie qu'à volume égal, davantage de charbon actif se trouve dans la cellule filtrante. En outre, en fonction du produit de charbon actif choisi, les grains de grande taille peuvent contenir un noyau qui n'a pas été entièrement activé lors de la production et qui ne peut pas être utilisé pour l'adsorption. Ces conditions nécessitent des intervalles d'échange plus courts pour les grains de plus grande taille (voir tableau 2) et entraînent des coûts de CAG plus élevés. Par ailleurs, les coûts spécifiques de CAG sont plus élevés avec une granulométrie plus grande, étant donné qu'il ne s'agit pas d'une granulométrie standard et que les fabricants de charbon actif de cette plage de granulométrie ne les produisent que sur commande spéciale, ce qui implique des coûts d'acquisition et de réactivation plus élevés.**

Tableau 2 : La granulométrie adéquate du CAG dépend de la concentration en MES en entrée de la filtration (voir annexe pour plus de détails).

Concentration MES [mg/l]	Granulation CAG [mm]	US Mesh CAG
< 5	0.6 – 2.4	8 * 30 (recommandation)
5 – 10	0.8 – 2.0	10 * 20
> 10	1.2 – 2.4	8 * 16

Jusqu'ici, la plupart des filtres CAG étaient des ouvrages en béton sous forme de **filtres gravitaires** à ciel ouvert. Des filtres fermés, sous forme de cuves en acier, à courant descendant (appelés **filtres sous pression**) sont désormais également utilisés. Ils peuvent être installés hors-sol dans des structures légères. Outre la flexibilité et la facilité des opérations de vidange/remplissage, cette solution présente d'autres avantages (p. ex. possibilités de correction en cas d'affaissement du sol, extensibilité, plus grande flexibilité grâce au retardement du lavage en cas d'avarie rendu possible par une réserve de pression à disposition).

<sup>3</sup> Le nombre de volumes de lit traités correspond au nombre total de m<sup>3</sup> d'eaux usées traitées divisé par le volume total du lit filtrant (surface filtrante multipliée par la hauteur du lit de CAG).

Lorsque les débits entrants sont sensiblement plus élevés que le débit temps sec, le taux d'épuration baisse en raison d'une dilution plus importante et de la réduction du temps de contact (EBCT).

Afin de compenser une **diminution de performance dans l'élimination des composés traces** en cas de débit élevé (par temps de pluie), les mesures opérationnelles ou les combinaisons suivantes peuvent être mises en œuvre :

- Mise en place d'une pré-ozonation<sup>4</sup>
- Mise en place d'un dosage de CAP supplémentaire dans la biologie
- Dosage de CAP avant la filtration sur CAG (pas encore d'expérience à ce sujet)
- Gestion des eaux pluviales dans le bassin versant (plan général d'évacuation des eaux, contrôle des volumes d'eau à acheminer, déversoirs d'orage...)
- **Opération parallèle dynamique : les filtres sont activés séparément et alimentés différemment en fonction de leur durée de vie (volume de lit) et du débit entrant. En cas de débit entrant élevé, les filtres ayant un volume de lit faible sont alimentés de façon disproportionnellement élevée, étant donné qu'ils atteignent un bon taux d'épuration même avec un temps de séjour plus faible. En parallèle, les filtres ayant un volume de lit élevé sont moins alimentés, de sorte que le temps de séjour et donc leur taux d'épuration sont plus élevés. En cas de débit entrant faible, certaines cellules filtrantes, avec un volume de lit faible, peuvent être désactivées ou alimentées plus faiblement, si bien qu'elles sont disponibles avec une durée de vie moindre en cas de pluie. Au stade de la planification, il convient donc de veiller à ce que les filtres à CAG puissent être alimentés individuellement par un système de pilotage approprié (voir aussi brochure DWA-T1/2019).**

### Autres aspects

- **Il n'est pas nécessaire de rajouter une couche de support pour les filtres à courant descendant et la largeur de fente des buses devrait être adaptée à la granulométrie.**
- En principe, il est possible de transformer des filtres à sable existants en filtres à CAG. Mais il convient de s'assurer que les temps de contact proposés sont respectés grâce à des adaptations (p. ex. augmentation de la hauteur de remplissage du matériau filtrant, augmentation de la taille du filtre) et que les équipements électromécaniques tel que les éléments permettant le lavage à l'air et à l'eau du CAG sont appropriés (les vitesses de lavage sont beaucoup plus faibles avec des filtres à CAG).
- **Une filtration sur CAG combinée à une déphosphatation (filtration par floculation) est techniquement réalisable en tenant compte de la boue précipitée supplémentaire, c'est-à-dire des concentrations totales en matières solides à l'entrée du filtre à CAG. En outre, l'élimination chimique du phosphore devrait prioritairement être exécutée avec une précipitation préalable et simultanée : moins il y a de précipitation avant la filtration, meilleur est le résultat. La floculation doit être clôturée avant la filtration. Toutefois, aucune analyse systématique des effets des précipitants sur le rendement d'épuration et sur la réactivité, qui influencent les coûts d'exploitation de la filtration sur CAG, n'a été menée. Ces incertitudes doivent être prises en compte dans la comparaison de variantes. Une utilisation étendue de la filtration sur CAG afin d'éliminer le phosphore peut éventuellement avoir une influence sur les coûts donnant droit à indemnisation.**
- L'efficacité d'adsorption et la durée de vie du CAG réactivé sont équivalentes à celles du charbon frais. Le CAG réactivé est toutefois plus économique et présente une empreinte carbone beaucoup plus faible.
- La sélection des substances pour contrôler le taux d'épuration des micropolluants peut avoir une influence sur la durée de vie/le volume de lits atteignable.
- Le lavage des filtres a un rôle important à jouer. Lorsque du CAG est introduit dans un filtre, la masse volumique apparente augmente d'env. 15 % (classification) après un premier lavage. Ce point doit être pris en compte lors de l'appel d'offres et de la facturation (voir paramètres de la masse volumique apparente par rapport à la masse volumique apparente après lavage dans la fiche de données ; voir aussi aide-mémoire DWA-M 285-2/2021). Un lavage optimal est atteint avec une expansion de lit d'env. 25 %. La

---

<sup>4</sup> Si les eaux usées sont adaptées à une ozonation conformément à la recommandation du VSA « Vérifications relatives à l'adéquation du processus d'ozonation », [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)

granulométrie et la masse spécifique du CAG doivent être pris en compte dans ce cadre-là ainsi que lors de la détermination des hauteurs de construction. Le nombre de lavages doit être minimisé, afin de réduire autant que possible la production d'eaux de lavage et l'abrasion du charbon (la dureté du charbon doit être prise en compte).

- Le rétrolavage à l'air du matériau filtrant génère une force de cisaillement élevée sur les grains de charbon actif et des interactions entre grains ont lieu dans la partie supérieure du lit filtrant. Cela entraîne une abrasion et donc des pertes de charbon actif. Dans ce contexte, la dureté du CAG sélectionné ne doit pas être trop faible.
- Le moment optimal pour remplacer le CAG des différentes cellules peut être évalué à l'aide des volumes de lit. La mesure du CAS<sub>254</sub> (en ligne ou en laboratoire) peut également être utilisée à cet effet. Elle sert aussi à contrôler le taux d'épuration. La détermination de l'élimination des composés traces résultant de la réduction du CAS lors de la filtration sur CAG comportant des incertitudes, elle doit être définie pour chaque installation.

### État du procédé

Les participants au workshop s'accordent à dire que les filtres à CAG sont adaptés à l'élimination des composés traces selon la législation suisse. Certaines questions en suspens, notamment sur la rentabilité et le taux d'épuration en cas de pluie, n'ont toutefois pas encore été entièrement élucidées. Ces points seront clarifiés grâce aux expériences d'exploitation.

### Bilan et recommandations

- En principe, les filtres à CAG sont appropriés à l'élimination des composés traces selon la législation suisse. Ils sont techniquement et économiquement réalisables et se sont révélés adaptés à la pratique.
- Pour ce faire, ils doivent présenter un temps de contact d'au moins 20 minutes par débit maximal. Ce dimensionnement plutôt généreux est actuellement pertinent, du moins pour les premières installations exploitées à l'échelle industrielle en Suisse.
- Le taux d'épuration en cas de pluie et les durées de vie résultantes pendant l'exploitation doivent être observés et documentés dans les premières installations réalisées à l'échelle industrielle. Des conclusions seront tirées pour de futurs projets sur la base de ces expériences.

## Annexe

Dans le cadre du projet « Solidus » (Schölzel et al., 2022), l'influence de la charge de matières solides sur les filtres à CAG a été étudiée plus en détail. Cette étude a pu confirmer que les filtres à CAG à courant descendant devaient être classés dans la catégorie des filtres de surface. Les temps de filtrage atteints et la charge de matières solides qui en résulte jusqu'au déclenchement du lavage sont à cet égard très variables. On peut s'attendre aux charges de matières solides suivantes jusqu'au déclenchement du lavage (ces valeurs devraient être atteintes dans 85 % des cas).

- Granulométrie 0,6 à 2,4 mm (données du projet Solidus) : 0,5 kg MES/m<sup>2</sup> (sans préfiltration) et 1,0 kg MES/m<sup>2</sup> (avec préfiltration)
- Granulométrie 0,8 – 2,0 mm (évaluation sur la base du projet Solidus) : 1,0 kg MES/m<sup>2</sup> (sans préfiltration)
- Granulométrie 1,2 à 2,4 mm (évaluation sur la base d'une filtration classique à lit profond avec cette granulométrie) : 2,0 kg MES/m<sup>2</sup> (sans préfiltration)

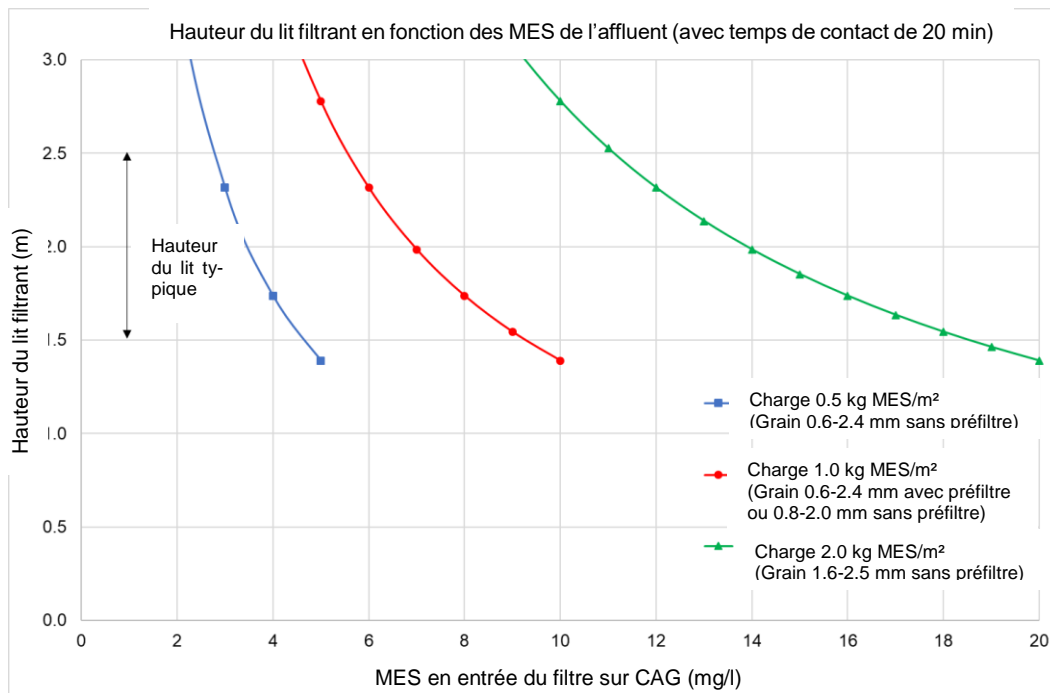
Ces valeurs s'appliquent pour une perte de pression disponible via la filtration d'une colonne d'eau de 3 à 4 mètres. Elles doivent être légèrement revues à la baisse en cas de perte de pression plus basse. Des pertes de pression disponibles plus importantes n'entraînent vraisemblablement pas une charge plus élevée, étant donné qu'une perte de pression plus importante génère davantage d'émanations gazeuses qui conduisent à leur tour à une perte de pression.

Il est recommandé d'effectuer un dimensionnement pour des temps de filtrage d'au moins 24 heures afin d'éviter les lavages supplémentaires, notamment par temps de pluie. En effet, les lavages requièrent de mettre le filtre à CAG concerné hors service et réduisent le temps de contact durant cette période, ce qui doit être évité. Il peut en revanche y avoir des temps de filtrage nettement plus élevés pendant l'exploitation (en fonction des conditions à l'entrée), ce qui permet d'économiser les coûts d'exploitation (recirculation moindre des eaux résiduelles, réduction des dépenses d'énergie pour les pompes). Il est donc conseillé d'établir un critère de déclenchement du lavage adapté aux besoins et propre à l'installation pendant l'exploitation (par exemple turbidité dans l'eau de sortie, pression, degré d'ouverture de la vanne d'écoulement).

La méthode de dimensionnement suivante est recommandée :

1. Détermination d'une charge de MES de 85 % en entrée de filtration sur CAG
2. Présélection de la granulométrie CAG en fonction de la concentration en MES de l'affluent
3. Détermination de la surface filtrante nécessaire sur la base des charges précitées
4. Détermination de la hauteur de filtre nécessaire (sur la base du temps de contact choisi et du volume filtrant qui en résulte)
5. Contrôle visant à déterminer si la hauteur du lit filtrant se situe dans la plage souhaitée (recommandation : 1,5 à 2,5 m, 3 m dans de bonnes conditions). À défaut : changement de la granulométrie du CAG ou mesures visant à réduire la charge de MES dans l'affluent et/ou dimensionnement avec lavages supplémentaires
6. Choix du nombre de cellules et de la surface par cellule. Contrôle des vitesses de filtration qui en résultent

Le graphique ci-dessous montre les hauteurs de lit filtrant résultantes pour les charges et granulométries précitées en fonction de la concentration en MES de l'affluent pour un temps de contact de 20 minutes.





## Sources :

Benstöm, F., Nahrstedt, A., Böhler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H. und Pinnekamp, J. (2016a). Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen, Ein Überblick über halbtechnischer und volltechnischer Untersuchungen – Teil 1: Veranlassung, Zielsetzung und Grundlagen, Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2016 (63) – Nr. 3, S. 187 – 192.

Benstöm, F., Nahrstedt, A., Böhler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H. und Pinnekamp, J. (2016b). Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen, Ein Überblick über halbtechnischer und volltechnischer Untersuchungen – Teil 2: Veranlassung, Zielsetzung und Grundlagen, Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2016 (63) – Nr. 4, S. 267 – 289.

Benstöm, F. (2017a). Granulierte Aktivkohle zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, RWTH Aachen, Deutschland

Benstoem, F., Nahrstedt, A., Böhler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H. und Pinnekamp, J. (2017b). Performance of granular activated carbon to remove micropollutants from municipal wastewater-A meta-analysis of pilot- and large-scale studies. Chemosphere 185, 105-118.

Böhler M., Joss A., McArdell C., Meier Brander A. (2020a). Notice explicative pour la planification et le dimensionnement de filtres à CAG rétrolavés discontinuellement pour l'élimination des composés traces organiques dans les eaux usées communales. Document de synthèse rédigé à la suite d'un workshop organisé des experts venus de Suisse et d'Allemagne, Eawag et VSA, Dübendorf. Précédente version de cette fiche d'information.

Böhler, M., Hernandez, A., Baggenstos, M., McArdell, C.S., Siegrist, H., Joss, A. (2020b). Elimination von Spurenstoffen durch granulierte Aktivkohle-Filtration (GAK): Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Furt, Bülach. Schlussbericht Eawag, Dübendorf, Schweiz. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A21845>.

Böhler, M. A., Joss, A., & McArdell, C. S. (2022). GAK-Filter für die Spurenstoffentfernung. Erfahrungen und Betriebsergebnisse der Pilotstudien ARA Furt/Bülach und Glarnerland. Aqua & Gas, 102(1), 48-54. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A24197>

DWA Themenband (2019). Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung \* Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte \* Mai 2019 · T1/2019.

DWA-Merkblatt 285-2 «Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung», September 2021, 68 Seiten, ISBN 978-3-96862-141-8.

Fundneider, T. (2020). „Filtration und Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Aufbereitung von kommunalem Abwasser – Phosphor- und Spurenstoffentfernung –“. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. Schriftenreihe IWAR (259). ISBN 978-3-940897-60-2. Verein zur Förderung des Instituts IWAR der TU Darmstadt e.V., Darmstadt.

Fundneider, T., Alonso, V.A., Wick, A., Albrecht, D., Lackner, S. (2021a). Implications of biological activated carbon filters for micropollutant removal in wastewater treatment. Water Research 189, 116588.

Fundneider, T., Alonso, V.A., Abbt-Braun, G., Wick, A., Albrecht, D., Lackner, S. (2021b). Empty bed contact time: The key for micropollutant removal in activated carbon filters. Water Research 191, 116765.

McArdell, C.S., Böhler, M., Hernandez, A., Oltramare C., Büeler A., Siegrist, H. (2020) Pilotversuche zur erweiterten Abwasserbehandlung mit granulierter Aktivkohle (GAK) und kombiniert mit Teilozonung (O3/GAK) auf der ARA Glarnerland (AVG), Ergänzende Untersuchungen zur PAK-Dosierung in die biologische Stufe mit S::Select®-Verfahren in Kombination mit nachfolgender GAK. Schlussbericht Eawag, Dübendorf, Schweiz. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A21543>.

Schölzel et al. (2022): Dimensionierung großtechnischer GAK-Filter durch Ermittlung der erzielbaren Feststoffbelastungen und Spülintervalle (SOLIDUS). Kurzbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.