

D U I S B U R G E S S E N

#### **Rapport final**

30-06-2004

#### Dr.-Ing. Wolfgang Uhl

(chercheur principal)

Université de Duisburg-Essen-Allemagne

Institute for Energy- and Environmental Process Engineering (Institut pour l'ingénierie des processus énergétiques et environnementaux)

Département des technologies de l'eau

Duisburg, Allemagne

En coopération avec : Dr.-Ing. Andreas Nahrstedt

(co-chercheur) IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Mülheim/Ruhr, Allemagne

#### **Collaborateurs :**

Dipl.-Ing. (FH) Karl Lakmann de l'Université de Duisburg-Essen Dipl.-Ing. (FH) Miriam Sustrath de l'Université de Duisburg-Essen



## <u>Sommaire</u>

1.	Obj	jectif du projet	3
2.	Usi	ine de filtration	3
2	.1	Reconstruction d'une usine de filtration	3
2	.2	Détails fonctionnels	3
	2.2.	.1 Dosage de la suspension d'argile	3
	2.2.	.2 Dosage des eaux usées	7
	2.2.	.3 Dosage du floculant, agrégation/floculation	7
	2.2.	.4 Colonnes de filtre	3
	2.2.	.5 Conception de la couche filtrante	9
	2.2.	.6 Répartition granulométrique des médias filtrants1	1
	2.2.	.7 Remplissage et rétrolavage des filtres avant fonctionnement13	3
	2.2.	.8 Régime de rétrolavage entre les cycles de filtre13	3
	2.2.	.9 Filtration et arrêt des cycles de filtre	5
3.	Rés	sultats des expériences de filtration avec rétrolavage à l'eau uniquement1	5
3	.1	Turbidité de l'influent vers les filtres15	5
3	.2	Élimination de la turbidité16	3
3	.3	Perte de charge totale20	)
3	.4	Comparaison des durées de cycles de filtre22	2
3	.5	Perte de charge incrémentielle dans les sections de filtre	2
3	.6	Diagrammes de Michaud pour la perte de charge24	4
3	.7	Contamination microbienne26	3
4.	Rés	sultats des cycles de filtre avec rétrolavage à l'eau et à l'air	9
4	.1	Informations générales29	9
4	.2	Résultats	)
5.	Rés	sumé et conclusions	1



## 1. Objectif du projet

L'objectif du projet est d'étudier le matériau filtrant FILTRALITE MC pour le traitement des eaux de ruissellement dans des projets expérimentaux pilotes. FILTRALITE MC (pour ce qui est de la filtration bicouche) sera notamment comparé à un autre matériau filtrant fréquemment utilisé en Allemagne. Comme il a été convenu dans une correspondance par e-mail entre Torgeir Saltnes de la société OPTIROC et les chercheurs, le matériau auquel sera comparé FILTRALITE est l'Hydro-Anthrasit H (d'Akdolit).

## 2. Usine de filtration

### **2.1 Reconstruction d'une usine de filtration**

Dès le début du projet, une usine pilote déjà existante au sein d'IWW a été reconstruite afin de répondre aux besoins du projet de filtration. Les anciens matériaux filtrants présents dans les colonnes de filtration ont été retirés et les colonnes démontées, puis soigneusement nettoyées afin de s'assurer que les résultats obtenus par la suite ne seraient pas des artefacts provoqués par des interférences avec la saleté déposée dans les conduites et sur les surfaces lors des expériences précédentes.

De nouveaux réservoirs, pompes et débitmètres ont été choisis, et des réservoirs de mélange ont été sélectionnés et étalonnés pour les cycles de filtre suivants. Le schéma de principe de la nouvelle usine de filtration après reconstruction est représenté dans la Fig. 2-1. Dans l'usine où sont réalisées les expériences, de l'eau du robinet déchlorée est versée dans un réservoir de mélange dans lequel parviennent également des eaux usées et une suspension d'argile, pompées par des pompes péristaltiques, afin d'obtenir la turbidité et la contamination microbiennes souhaitées. Depuis le réservoir de mélange, l'eau est transférée par différence hydrostatique vers trois bassins de floculation disposés en série. Le floculant est versé dans la première chambre. L'effluent de la dernière chambre est transféré vers les deux colonnes de filtration parallèles.

La Fig. 2-2 est une photographie du réservoir d'eaux usées (pompées dans le système pour éviter les dépôts), du réservoir de la suspension d'argile et du bassin mélangeur avec les pompes et les agitateurs. La Fig. 2-3 montre le réservoir du floculant. Le floculant est mélangé à la colonne de couleur ocre et versé dans le bassin de floculation à l'aide d'une pompe à membrane (non visible). Les chambres de floculation sont présentées dans la Fig. 2-4 et les colonnes de filtration dans la Fig. 2-5.





Fig. 2-1 : Schéma de principe de l'usine de filtration



Fig. 2-2 : Le réservoir d'eaux usées (blanc, au premier plan, avec le couvercle noir), la suspension d'argile (au milieu, vert foncé, avec l'agitateur rouge) et le bassin mélangeur (blanc, avec les deux pompes doseuses péristaltiques (vertes) en haut et l'agitateur (rouge).





Fig. 2-3 : Le réservoir mélangeur (blanc, à droite, au milieu), le réservoir du floculant (ocre, à gauche, au milieu) et les chambres de floculation (au fond, à gauche).



Fig. 2-4 : Chambres de floculation avec agitateurs





Fig. 2-5 : Colonnes de filtration ; la colonne de droite contient du sable et de l'OPTIROC FILTRALITE MC

#### **2.2 Détails fonctionnels**

#### 2.2.1 Dosage de la suspension d'argile

L'argile a été ajoutée à l'eau d'alimentation pour obtenir une turbidité finale d'environ 5 UTF. Cette turbidité est comparable à l'eau de surface de la rivière Ruhr, utilisée comme eau de source pour le traitement de l'eau potable de Mülheim. Pendant deux ans (1995/1996), la turbidité de l'eau de la rivière a été mesurée 112 fois. Les 10 % de turbidité les plus élevés ont été considérés comme des valeurs aberrantes et ont été rejetés. Aucune valeur aberrante de faible turbidité n'a été identifiée. La moyenne des 90 % restants était de 5,0 UTF.

L'argile T 4003, fournie par Kärlicher Ton und Schamottewerke de Mannheim en Allemagne, a été ajoutée. Cette argile a été choisie pour sa faible teneur en oxydes de fer. La taille des particules (telles que fournies par le fabricant) est inférieure à 6,3  $\mu$ m (env. 75 % de sa masse). Seuls 3,4 % du volume total sont supérieurs à 63  $\mu$ m.

Avec l'argile, une relation linéaire entre la turbidité et la concentration a été identifiée dans la plage de concentration allant de 0 à 16 mg/l, avec une pente de 1,1 UTF/(mg/l). La suspension d'argile sera dosée de sorte à obtenir une concentration finale de 4,5 mg/l.



#### 2.2.2 Dosage des eaux usées

Des eaux usées sont ajoutées de manière à obtenir une contamination microbienne de l'eau d'alimentation. Les eaux usées des effluents d'un bassin de décantation provenant d'une usine de traitement municipale ont été collectées, puis transportées au laboratoire, après traitement de ses boues activées.

La contamination microbienne de l'eau de surface de la rivière Ruhr est d'environ 3 103 coliformes/(100 ml) et d'environ 1 000 bactéries E. coli/(100 ml). Nous espérons l'élimination d'environ 1 unité logarithmique pendant la filtration et devons envisager une élimination par floculation. Une concentration cible d'environ 3 000 coliformes/(100 ml) dans notre eau d'alimentation pilote, par adjonction d'eaux usées, est par conséquent adéquate.

Une étude préliminaire des eaux usées a montré une contamination microbienne d'environ 3 106 coliformes/(100 ml). Dans un premier temps, des eaux usées ont donc été ajoutées à l'eau du robinet selon un facteur de 1:1 000 ou 1 l/m3. Soit 1,5 l/h dans le cours d'eau infiltrant (débit total de l'influent de 1,5 m3/h).

Pendant les expériences continues, le dosage des eaux usées a été augmenté et défini sur des facteurs de 1:500 avec trois campagnes d'échantillonnage microbiologique, et de 1:250 et 1:125 avec une campagne d'échantillonnage microbiologique par facteur.

#### 2.2.3 Dosage du floculant, agrégation/floculation

Le chlorure de polyaluminium a été choisi comme floculant. Il s'avère généralement être plus adapté au traitement de l'eau de ruissellement de la région de la Ruhr. Le dosage a été fixé à 3 mg/l, ce qui équivaut à 0,11 mmol Al/l.

Le floculant « Gilufloc 83 »(n° de produit 23676) de BK Giulini Chemie de Ludwigshafen, en Allemagne, a été choisi. Les dosages sont détaillés dans le tableau 2–1.



D U I S B U R G E S S E N

Volumetric flow rate all filters Q = 1,53 m <sup>3</sup> /h	<i>no. of filters: 2</i> total filter surface area superficial flow rate	$A_f = 0,102 \text{ m}^2$ $v_f = 15,0 \text{ m/h}$
	basicicity of product:	83%
	density of product:	$\rho = 1.340 \text{ kg/m}^3$
	weight product Al-content	$c_{AI} = 0,122 \text{ kg AI/kg product}$
	vol. product Al-content	$c_{AI} =$ 163 g Al/l product
spec. dosage Al:		
c = 3,0 mg Al / I raw water c' = 0,11 mmol Al / I raw water	product dosage: product dosage: dayly dosage:	$\begin{aligned} & Q_{Prod} = & 0,47 \text{ ml/min} \\ & C_{Prod} = & 18,39 \text{ ml/m}^3 \\ & V_{Prod} = & 0,7 \text{ l / day} \end{aligned}$

Tableau 2–1 : Dosage du floculant Gulifloc 83 (Giulini, n° de produit 23676)

Tableau 2-2 : Dimensions et données d'exploitation des chambres de floculation

chamber no.	dimensions	volume	res.time	stirrer size	stirrer speed
unit	mm	m³	min	m	rpm
1	300*600*720	0,130	5,6	0,37	18
2	500*600*720	0,216	9,3	0,27	30
3	500*600*720	0,216	9,3	0,27	45

#### 2.2.4 Colonnes de filtre

L'usine pilote dispose de deux colonnes de filtre, chacune ayant un diamètre interne de 255 mm. La hauteur totale des deux colonnes est de 2,50 m. Sur leur longueur, les deux colonnes sont équipées de plusieurs fenêtres pour dispositifs d'échantillonnage, à différentes profondeurs de couche. Pour les expériences à mener dans le cadre de ce projet, il a été décidé d'équiper chaque colonne de cinq fenêtres. La position des fenêtres est décrite à la section II.2.5.



#### 2.2.5 Conception de la couche filtrante

Après accord avec OPTIROC, les couches filtrantes ont été conçues conformément aux données fournies dans le tableau 2–3 et à la représentation graphique Fig. 2-6. Sur cette figure, la zone d'expansion de la couche filtrante attendue lors du rétrolavage était déjà représentée.

Le matériau filtrant Hydroanthrasit H est un produit à base de charbon traité thermiquement. Il ne contient pas d'anthracite contrairement à ce que son nom commercial pourrait faire croire. Le traitement thermique le rend légèrement poreux, mais moins poreux que le charbon actif. En outre, il a une certaine capacité d'adsorption. Sa superficie BET est de 160 à 260 m<sup>2</sup>/g, ce qui est très faible comparé au charbon actif dont la capacité d'adsorption est comprise entre 700 et  $800 \text{ m}^2/\text{g}$ .

En Allemagne, l'Hydroanthrasit H est très souvent choisi pour la filtration bicouche, en association avec le sable de quartz en couche inférieure. C'est la raison pour laquelle les chercheurs ont suggéré à OPTIROC de le comparer à FILTRALITE.

	gravel (support layer, both columns)	quarz sand (lower layer, both columns)	Hydro- anthrasit H (upper layer, column 1)	Filtralite MC (upper layer, column 2)
bed density in kg/m³	approx. 1450	approx. 1450	approx. 730	approx. 730
layer hight in cm	100	700	800	800
mass per filter in kg	7	52	46	46
grain size in mm	3,15 - 5,6	0,7 - 1,25	1,4 - 2,5	1,5 - 2,5
effective hydraulic grain size in mm		0,942	1,91	1,93
head loss expected in mbar		65,58	11,18	approx. 11

Tableau 2–3 : Caractéristiques des couches filtrantes à comparer





Fig. 2-6 : Composition des médias filtrant

Comme nous l'avons indiqué au chapitre précédent, les deux colonnes ont été équipées de cinq fenêtres de prise d'échantillons, à des positions identiques pour les deux filtres. La première fenêtre de prise d'échantillons, appelée « influent » durant l'évaluation des données, est située dans la zone d'expansion de la couche. La deuxième fenêtre est située à environ un tiers de la couche d'Hydroanthrasit H et de Filtralite MC, afin de déterminer les performances de filtration de la couche la plus élevée. La troisième fenêtre se trouve dans la transition entre le Filtralite MC ou l'Hydroanthrasit H, respectivement, et la couche de sable. La quatrième fenêtre se trouve après les deux tiers environ des couches de sable. La cinquième et dernière fenêtre est située à la fin des couches de sable. Ainsi, la couche filtrante, qui comprend deux couches, peut être divisée en quatre segments. Ces segments sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 2–4 :

segment no.	from to	description	segment length
1	top of filter layer to port 2	after approximately one third of upper layer; covers behaviour of upmost filter material	26 cm
2	port 2 to port 3	in transition zone between upper layer and lower layer	53 cm
3	port 3 to port 4	after approx. two thirds of sand layer	50 cm
4	port 4 to port 5	end of sand layer	26 cm



#### 2.2.6 Répartition granulométrique des médias filtrants

Les répartitions granulométriques de l'Hydroanthrasit H et du FILTRALITE MC ont été déterminées.

Les résultats relatifs à l'Hydroanthrasit H (Filtre 1) sont précisés dans la Fig. 2-7 et le tableau 2–5 en indique les détails.



Fig. 2-7 : Répartition granulométrique de l'Hydroanthrasit H (Filtre 1)

Tableau 2–5 : Résultats de l'analyse du criblage de l'Hydroanthrasit H (Filtre 1)

			Exigence DIN EN 12907:
Plus petit pourcentage	(mass fraction < 1,4 mm [%]:	1,5%	< 5 %
Plus grand pourcentage (mass fraction < 2,5 mm [%]:		1,9%	< 5 %
Taille minimum d <sub>1</sub>	[mm] :		
Taille effective d <sub>10</sub>	[mm] :	1,62	
Taille d <sub>60</sub>	[mm] :	1,99	
Tailled <sub>90</sub>	[mm] :	2,35	
Coefficient d'uniformi	té U [-] :	1,23	< 1,5
Taille hydraulique effective $d_h$ [mm] :		1,91	
Taille moyenne Q <sub>3</sub>	[mm] :	1,96	







Fig. 2-8 : Répartition granulométrique du FILTRALITE MC (Filtre 2)

Tableau 2-6 : Résultats de l'analyse du criblage du FILTRALITE MC

	Exigence DI	N EN 12905:	
Plus petit pourcentage (mass fraction < 1,5 mm [%]:	4,1%	< 5 %	
Plus grand pourcentage (mass fraction < 2,5 mm [%]:	2,4%	< 5 %	
Taille minimum d1 [mm] :			
Taille effective $d_{10}$ [mm] :	1,61		
size $d_{60}$ [mm]:	2,13		
size $d_{90}$ [mm]:	2,39		
Coefficient d'uniformité U [ - ] :	1,32	< 1,5	
Taille hydraulique effective d <sub>h</sub> [mm] :	1,93		
Taille moyenne Q <sub>3</sub> [mm] :	2,03		



La comparaison des analyses de criblage de l'Hydroanthrasit H et du FILTRALITE MC montre que les deux matériaux à comparer ont (dans les limites d'erreur) des étendues granulométriques similaires.

#### 2.2.7 Remplissage et rétrolavage des filtres avant fonctionnement

Avant le remplissage, les matériaux filtrants (sable, Hydroanthrasit H et Filtralite MC) ont été trempés pendant une semaine avant d'être prélavés manuellement. Les abrasifs fins ont été, autant que possible, directement éliminés par lavage. Les grains flottants ont été écumés.

Dans un premier temps, le sable a été versé afin qu'il se dépose dans les colonnes préalablement remplies d'eau. Une fois la couche de sable déposée, les colonnes ont été refermées et la couche de sable a été rétrolavée jusqu'à ce que l'eau se trouvant au-dessus du lit expansé apparaisse claire. Ce résultat a été obtenu après 45 minutes de rétrolavage à 2 m3/h, soit approximativement 45 m/h. Après sédimentation, les colonnes ont été rouvertes et quelques centimètres de sable ont été écumés. La même hauteur de couche de sable a été écumée dans les deux colonnes.

Ensuite, les colonnes ont été de nouveau remplies d'eau, puis le FILTRALITE MC et l'Hydroanthrasit H, respectivement, ont été déposés par sédimentation dans les colonnes, en couches égales. Les filtres ont ensuite été rétrolavés à l'eau pendant 30 minutes à un débit de 60 m/h pour l'Hydroanthrasit H et de 70 m/h pour le Filtralite, pour une expansion de lit comparable. Après 30 minutes de rétrolavage, tous les abrasifs avaient été éliminés et l'effluent était clair.

Pour l'Hydroanthrasit H et FILTRALITE MC, aucun écumage de la couche supérieure n'a été réalisé. En effet, OPTIROC n'avait pas fourni de matériau filtrant de réserve. Ceci aurait permis d'obtenir un lit légèrement plus grand que celui souhaité et de réaliser un écumage.

#### 2.2.8 Régime de rétrolavage entre les cycles de filtre

#### 2.2.8.1 *Rétrolavage exclusivement à l'eau*

Des expériences ont été effectuées sur les rétrolavages afin de déterminer le débit idéal et d'éviter de mélanger le sable avec l'Hydroanthrasit H ou le FILTRALITE. Il a été décidé de ne pas procéder au rétrolavage à l'air, susceptible (dans les colonnes pilotes) d'entraîner le mélange des différents matériaux filtrants. Néanmoins, le rétrolavage à l'air ne devrait pas poser de problème dans les filtres grandeur nature.

Le rétrolavage après un cycle de filtre est réalisé avec de l'eau du robinet à un débit de 65 m/h pendant 30 minutes L'expansion approximative de la couche filtrante en situation de rétrolavage est représentée dans la Fig. 2-9.





Fig. 2-9 : Expansion du lit pendant un rétrolavage à un débit de 60 à 65 m/h

Dans les colonnes pilotes, lors d'un rétrolavage à l'air, les tourbillons résultant du rapport entre le faible diamètre et la longueur du lit risquent toujours d'entraîner le mélange des deux couches, un résultat difficilement réversible. Il a donc été décidé de rétrolaver les deux colonnes à l'eau uniquement pour la plupart des cycles de filtre. Cette pratique n'entraînant pas systématiquement l'élimination complète des grains du filtre, les cycles de filtre suivants ont fait l'objet d'un rétrolavage à l'air et à l'eau.

#### 2.2.8.2 *Rétrolavage à l'eau/à l'air*

Une fois la majeure partie des cycles de filtre effectuée, trois cycles de filtre supplémentaires ont été réalisés avant lesquels les filtres ont subi un rétrolavage à l'air et à l'eau. Ces rétrolavages ont été réalisés comme suit :

Dans un premier temps, l'eau a été purgée de manière à atteindre le niveau du lit. Le flux d'air a ensuite été ouvert pendant 10 minutes à un débit de 3 Nm3/h, soit 60 m/h. L'expansion du lit a été d'environ 32 cm. Après 2 minutes, le rétrolavage à l'eau a été lancé conformément à la description donnée à la section II.2.8.1.



#### 2.2.9 Filtration et arrêt des cycles de filtre

La filtration a été effectuée à un débit superficiel de 15 m/h (760 l/h par colonne de filtre). Les cycles de filtre devaient être arrêtés en cas de dépassement de la perte de charge de 120 mbar.

# 3. Résultats des expériences de filtration avec rétrolavage à l'eau uniquement

#### 3.1 Turbidité de l'influent vers les filtres

Comme indiqué au chapitre 2.2.2, le dosage en eaux usées a été modifié entre les cycles de filtre afin de tenir compte des différentes contaminations microbiennes des influents des filtres, ce qui a eu une incidence sur la turbidité des influents. En outre, la turbidité des influents était, bien entendu, sujette à variations, ce qui explique également la dispersion de l'analyse. La turbidité des influents a toujours été mesurée dans l'influent des deux filtres, c'est-à-dire avec l'Hydroanthrasit H et le FILTRALITE MC. Les Fig. 3-1 et Fig. 3-2 représentent les turbidités des deux filtres, mesurées durant les deux cycles de filtre. La comparaison des influents vers les deux filtres pour chaque cycle démontre que leur turbidité était comparable. Par ailleurs, on peut voir que les turbidités étaient dans l'ordre de grandeur escompté, c'est-à-dire, comparable à la turbidité de l'eau de surface de la Ruhr.



Fig. 3-1 : Turbidité de l'influent vers le filtre Hydroanthrasit H pendant les cycles de filtre





Fig. 3-2 : Turbidité de l'influent vers le filtre FILTRALITE MC pendant les cycles de filtre

#### 3.2 Élimination de la turbidité

L'élimination totale de la turbidité (c'est-à-dire, respectivement, de la couche de sable inférieure et de la couche d'Hydroanthrasit H et de FILTRALITE MC supérieure) est représentée par des graphiques, Fig. 3-3 et 3-4, respectivement, sous la forme de l'élimination intégrée de la turbidité. L'élimination intégrée ou cumulative d'une quantité X au moment tN se calcule selon l'équation suivante :

$$\Delta \operatorname{Xint} = \sum_{\square=I}^{\square} (\square_{\square} (t_{\square} - \square_{\square-I}) \Delta t X_{\square})$$
Avec

 $\Delta X_{\Box} = (X_{\Box \Box \Box \Box'} - X_{\Box \Box \Box})$ 

L'avantage de cette méthode d'évaluation des données est que, au fur et à mesure que le temps passe, le résultat se dégage de plusieurs mesures. Ainsi, la précision augmente dans le temps et les différences entre (ici) les deux matériaux filtrants apparaissent, ce qui n'aurait pas été le cas si l'on avait comparé des mesures uniques à des moments distincts.

Qui plus est, le volume intégré d'une quantité X éliminée peut être directement exprimé comme une charge de quantité X dans les segments de filtre.

Quant à la turbidité, l'unité d'élimination de la turbidité intégrée est l'UNF m3.





Fig. 3-3 : Élimination totale et intégrée de la turbidité pour le filtre « Hydroanthrasit H »



Fig. 3-4 : Élimination totale et intégrée de la turbidité pour le filtre « FILTRALITE MC »

En général, il n'y a pas de différence notable entre les éliminations totales et intégrées de la turbidité des deux filtres Hydroanthrasit H et FILTRALITE MC. La comparaison directe des performances des deux filtres pour chaque cycle de filtre permet de constater que le filtre avec FILTRALITE a obtenu de meilleures performances que le filtre Hydroanthrasit H au niveau de l'élimination de la turbidité durant les quatre premiers cycles de filtre. Après le quatrième cycle, néanmoins, les performances des matériaux atteignent un niveau équivalent. D'une manière générale, les performances des deux matériaux se sont améliorées au fil des cycles.

La raison la plus probable à ce phénomène est la coagulation et le dépôt de couches d'hydroxyde d'aluminium dans les pores des grains et sur les grains des filtres. Ces couches bloquent les pores des matériaux filtrants poreux comme FILTRALITE, ce qui entraîne un rapprochement des performances de FILTRALITE et de l'Hydroanthrasit H. D'un autre côté, ces couches donnent forment une surface de composants chimiques comparable à celle des flocons. Par conséquent,



ce sont des surfaces mieux adaptées à la coagulation et au dépôt de flocons issus de la phase liquide volumique et à leur emprisonnement. C'est pour cette raison que l'on observe une meilleure élimination de la turbidité de cycle en cycle. Cette amélioration ne se poursuivra toutefois pas indéfiniment.

Des réserves ont été émises sur l'interprétation de l'amélioration des performances de filtration de cycle en cycle. Le dosage des eaux usées a été augmenté, comme indiqué à la section II.2.2. Cette augmentation a entraîné l'aggravation de la turbidité dans l'influent. Par exemple, la turbidité moyenne durant le quatrième cycle était de 4,81 UNF, tandis que le cycle 17 enregistrait 6,61 UNF. Comme dans la filtration, l'élimination des particules (ou de la turbidité) dépend de la concentration en particules. Une plus grande efficacité de l'élimination pour les cycles de filtre ultérieurs peut également être due à des concentrations supérieures en influent.

Afin de mieux illustrer le rapprochement des performances de filtration de l'Hydroanthrasit H et du Filtralite MC, l'élimination intégrée de la turbidité lors du 4e cycle (19/02/2004), du 12e cycle (04/03/2004) et du 17e cycle (18/03/04) est représentée dans les figures suivantes.



Fig. 3-5 : Élimination intégrée de la turbidité des filtres Hydroanthrasit H et FILTRALITE MC lors du 4e cycle de filtre. (Turbidité moyenne de l'influent : 4,81 UNF, 4,1 %, n = 18)





Fig. 3-6 : Élimination intégrée de la turbidité des filtres avec Hydroanthrasit H et FILTRALITE MC lors du 12e cycle de filtre. (Turbidité moyenne de l'influent : 4,43 UNF, 15,7 %, n = 18)



Fig. 3-7 : Élimination intégrée de la turbidité des filtres avec Hydroanthrasit H et FILTRALITE MC lors du 17e cycle de filtre. (Turbidité moyenne de l'influent :  $6,61 \text{ UNF}, \Box 5,0 \%, n = 18$ )

L'élimination intégrée (ou accumulée) de la turbidité pouvant être quelque peu abstraite, la turbidité des influents et des effluents des filtres pour les mêmes cycles que dans les Fig. 3-5 et 3-6, est représentée dans les Fig. 3-8 et 3-9.





Fig. 3-8 : Turbidité des influents et des effluents durant le cycle de filtre analysé dans la Fig. 3-5.



Fig. 3-9 : Turbidité des influents et des effluents durant le cycle de filtre analysé dans la Fig. 3-6.

#### 3.3 Perte de charge totale

La perte de charge totale (c'est-à-dire, entre l'influent et l'effluent d'un filtre), en fonction du temps de filtration pour tous les cycles, est présentée Fig. 3-10 (Hydroanthrasit H) et Fig. 3-11 (FITRALITE MC). La comparaison entre la perte de charge initiale au début des cycles et celle estimée pour les couches filtrantes, indiquée dans le tableau 2-3, montre que le filtre avec FILTRALITE donne les performances attendues. Néanmoins, le filtre avec Hydroanthrasit H affiche des performances un peu inférieures à celles attendues, la perte de charge étant légèrement plus élevée.





Fig. 3-10 : Perte de charge totale en fonction du temps de cycle pour tous les cycles et avec le filtre hydro-anthracite H



Fig. 3-11: Perte de charge totale en fonction du temps de cycle pour tous les cycles de filtration, avec le filtre FILTRALITE MC

On constate par ailleurs, que la différence entre l'Hydroanthrasit H et le Filtralite a même tendance à s'accentuer. À la fin d'un cycle, la perte de charge du filtre avec Hydroanthrasit H est environ 15 % supérieure à celle du filtre avec FILTRALITE. Ce résultat peut être dû au fait que l'Hydroanthrasit H est plus sensible à l'abrasion pendant la filtration et le rétrolavage, et que des grains plus petits se sont accumulés à la surface du filtre.



#### 3.4 Comparaison des durées de cycles de filtre

Pendant les expériences pilotes, les cycles de filtre devaient être interrompus lorsqu'une perte de charge totale de 120 mbar était dépassée dans une des deux colonnes. Comme on peut le déduire de la Fig. 3-10 et de la Fig. 3-11, le filtre avec Hydroanthrasit H a toujours été le premier à atteindre ce point. Si l'on rapporte la durée de cycle du filtre FILTRALITE MC à une perte de charge totale de 120 mbar, le filtre aurait pu être utilisé 1,5 heure de plus, ce qui correspond à une augmentation du cycle de filtre d'environ 25 % entre deux rétrolavages.

#### 3.5 Perte de charge incrémentielle dans les sections de filtre

Afin de comprendre les raisons d'une perte de charge supérieure dans le filtre 1 avec Hydroanthrasit H par rapport à celle constatée avec le FILTRALITE, la perte de charge incrémentielle (c'est-à-dire, la perte de charge par unité de longueur et profondeur du filtre) en fonction de l'élimination de la turbidité a été analysée avec précision. Les résultats sont représentés sous forme graphique dans la Fig. 3-12 pour l'Hydroanthrasit H et dans la Fig. 3-13 pour le FILTRALITE.

Dans cet objectif, la turbidité éliminée dans un segment (c'est-à-dire, l'élimination intégrée ou accumulée de la turbidité) est rapportée au volume de filtre de ce segment. C'est ce que l'on appelle la charge de turbidité moyenne. Par conséquent, l'unité de la charge de turbidité moyenne est [UNF m3/m3].



Fig. 3-12 : Perte de charge incrémentielle en fonction de la charge de turbidité moyenne pour le filtre 1 avec Hydroanthrasit H





Fig. 3-13 : Perte de charge incrémentielle en fonction de la charge de turbidité moyenne pour le filtre 2 avec FILTRALITE MC

C'est en comparant les lignes de régression que l'on peut voir clairement que dans le segment supérieur du filtre avec Hydroanthrasit H, la perte de charge incrémentielle est supérieure à celle du segment du filtre avec FILTRALITE. Ceci n'est pas seulement dû à l'élimination de la turbidité, car la différence existe déjà lorsque la charge de turbidité est proche de zéro.

Ce résultat est plus clairement représenté dans la Fig. 3-14, où seules les deux lignes de régression ont été tracées. Comme on peut le voir sur la représentation graphique, les deux lignes sont presque parallèles. Ce qui signifie que, pour les deux filtres, l'élimination de la turbidité entraîne la même aggravation de la perte de charge. La différence constatée au niveau de la perte de charge des deux filtres n'est que le résultat de la perte de charge au début du cycle de filtration. Ceci est alors probablement dû aux grains plus fins à la surface du filtre avec Hydroanthrasit H.





D U I S B U R G E S S E N

Fig. 3-14 : Régression de la perte de charge incrémentielle par rapport à la charge de turbidité moyenne dans les segments supérieurs des filtres avec Hydroanthrasit H et FILTRALITE MC.

Cette constatation est confortée par le fait que, dans le deuxième segment des filtres, la perte de charge incrémentielle dans les deux filtres avec Hydroanthrasit H et FILTRALITE, fonction de la turbidité éliminée, est quasiment identique. C'est ce que montre la Fig. 3-15. La différence à des charges de turbidité élevées n'est pas significative.



Fig. 3-15 : Régression de la perte de charge incrémentielle par rapport à la charge de turbidité moyenne dans les deuxièmes segments des filtres avec Hydroanthrasit H et FILTRALITE MC.

Lorsque l'on extrapole la perte de charge incrémentielle dans le segment 2 par rapport à la charge de turbidité proche de 0 (interception de l'axe des ordonnées), on obtient une perte de charge incrémentielle d'environ 28 mbar/cm pour les deux médias granulaires. Pour FILTRALITE, néanmoins, cette valeur est supérieure à 0,18 mbar/cm pour le premier segment. À première vue, cela semble contradictoire puisqu'on attendrait des valeurs supérieures pour le premier segment, comme pour Hydroanthrasit H. Il convient toutefois de tenir compte du fait que le segment 2 est déjà influencé par la couche de sable, car, après le rétrolavage des filtres, une zone de transition s'est formée où le sable s'est mélangé au FILTRALITE ou à l'Hydroanthrasit H. Ainsi, la perte de charge incrémentielle plus élevée que celle escomptée dans le segment 2 de FILTRALITE est également déterminée par le volume inférieur de grains de sable.

#### **3.6 Diagrammes de Michaud pour la perte de charge**

Dans les diagrammes de Michaud, la pression dépendant de la profondeur du lit est comparée à la pression hydrostatique. Il s'agit ainsi d'excellents outils d'analyse et d'interprétation de l'évolution de la perte de charge pendant le fonctionnement du filtre.



Les diagrammes de Michaud des Fig. 3-16 et 3-17 montrent la pression au début d'un cycle de filtre et à la fin, c'est-à-dire après environ 6 h de filtration. En situation de lits propres, on peut voir, de manière toutefois moins évidente que sur les diagrammes comparant la perte de charge incrémentielle à la charge de turbidité, que la perte de charge des segments 1 et 2 combinés (= couche 1) est légèrement inférieure pour le FILTRALITE que pour l'Hydroanthrasit H.



Fig. 3-16 : Diagramme de Michaud pour un seul cycle de filtre, filtre 1 : Hydroanthrasit H /sable





Fig. 3-17 : Diagramme de Michaud pour un seul cycle de filtre, filtre 2 : FILTRALITE MC/sable

Il est intéressant de noter que, dans les segments 3 et 4 combinés (= couche 2), la perte de charge est supérieure pour le filtre Hydroanthrasit H/sable. À première vue, cela semble inattendu, car, dans les deux filtres, les segments 3 et 4 contiennent tous deux le même sable. C'est la raison pour laquelle une étude plus approfondie a été réalisée sur la perte de charge dans les segments 3 et 4 propres des deux filtres. Nous avons découvert que, conformément aux prévisions, dans les segments 4, c'est-à-dire, les segments les plus bas, la perte de charge était la même pour les deux filtres. La différence entre les filtres Hydroanthrasit H et FILTRALITE provenait entièrement des segments 3. Une observation affinée des deux filtres a révélé la présence d'une zone de mélange plus prononcée entre FILTRALITE et le sable qu'entre Hydroanthrasit H et le sable. Ainsi, étant donné qu'une plus grande quantité de sable a été trouvée dans le segment 2 avec une perte de charge accrue (voir section ci-dessus), du FILTRALITE a également été incorporé dans le segment 3 et une perte de charge moindre a été observée dans ce segment, en raison d'une augmentation de la porosité.

À la fin des cycles de filtre, comme vu à la section III.3, la perte de charge totale est légèrement supérieure pour le filtre Hydroanthrasit H/sable à celle du filtre FILTRALITE/sable. Dans les diagrammes de Michaud, la pression correspondant au cycle représenté est d'environ 1,32 m CE pour le filtre 1 et 1,45 m CE pour le filtre 2.

#### **3.7** Contamination microbienne

Au total, six campagnes d'échantillonnage ont été réalisées pour l'analyse de la contamination microbienne de l'eau à différentes profondeurs de couche.

Durant la première campagne, les eaux usées ont été dosées selon un rapport de 1:1 000. Les résultats de cette analyse sont indiqués dans le tableau 3–1. L'influent des deux colonnes a été prélevé deux fois, soit une fois dans chaque colonne. La comparaison des valeurs des influents (A et B) révèle la variation de l'analyse microbiologique. Dans chaque colonne de filtre, un échantillon a ensuite été prélevé à deux profondeurs de couche : au milieu et à la fin des couches d'Hydroanthrasit H et de FILTRALITE MC, respectivement. Ces résultats ne révèlent aucune différence au niveau de l'efficacité d'élimination des particules de l'Hydroanthrasit H et de FILTRALITE.



sampling point	colony count	coliforms	E. coli	Enterococci
	(20°C) [cfu/ml]	[MPN/ 100 ml]	[MPN/ 100 ml]	[cfu/100 ml]
influent A	182	74	11	2
influent B	158	31	2	3
HA-middle	199	89	11	2
HA-end	184	53	9	2
OPTI-middle	140	66	12	3
OPTI-end	510	201	24	1

Tableau 3–1 : Résultats de la première campagne d'échantillonnage microbiologique (dosage des eaux usées à 1:1 000).

Comme nous avions bon espoir qu'un dosage supérieur des eaux usées engendrerait une contamination bactérienne plus forte et que cela permettrait de détecter des différences entre les deux matériaux filtrants, le dosage des eaux usées a été doublé pour les cycles de filtre suivants.

Pourtant, comme on peut le constater dans le tableau 3–2, la contamination microbienne s'est révélée bien inférieure à celle déterminée durant le premier cycle. Cette baisse relève des variations affectant la composition des eaux usées provenant de l'usine de traitement des eaux usées. En outre, comme le montre également le tableau, les variations de l'analyse microbiologique sont si prononcées qu'aucune différence ne peut être observée entre les matériaux filtrants Hydroanthrasit H et OPTIROC FILTRALITE MC.



sampling point	colony count	coliforms	E. coli	Enterococci	Clostridium perfiringens
	(20 C) [cfu/ml]	100 ml]	100 ml]	[cfu/100 ml]	[cfu/100 ml]
influent A	39	4	0	0	0
influent B	63	2	0	0	0
HA-middle	51	1	0	0	1
HA-end	44	0	0	0	0
OPTI-middle	69	3	0	0	1
OPTI-end	23	0	0	0	0
influent A	410	4	1	0	1
influent B	205	4	0	0	1
HA-middle	78	4	1	0	1
HA-end	26	1	0	0	2
OPTI-middle	53	2	0	0	0
OPTI-end	41	1	0	0	2
influent A	84	12	1	1	1
influent B	73	14	3	2	1
HA-middle	74	14	1	6	0
HA-end	21	14	3	1	0
OPTI-middle	40	15	2	1	0
OPTI-end	57	8	2	3	0

Tableau 3–2 : Résultats de l'analyse microbiologique des cycles de filtration avec un dosage des eaux usées à 1:500.

Durant les cycles de filtre suivants, le dosage des eaux usées a été encore augmenté de manière à atteindre des facteurs de 1:250 et 1:125 (2 cycles chacun ; chacun prélevé pour l'analyse de la contamination microbienne). Les résultats sont présentés dans les tableaux 3–3 et 3–4. Pour ces dosages élevés également, les dosages maximums applicables dans l'usine pilote, la dispersion des données de contamination microbiologique est encore trop importante pour révéler les différences entre les deux matériaux filtrants.



sampling point	colony count	coliforms	E. coli	Enterococci	Clostridium perfiringens
	(20°C) [cfu/ml]	[MPN/ 100 ml]	[MPN/ 100 ml]	[cfu/100 ml]	[cfu/100 ml]
influent A	79	22	4	3	3
influent B	74	24	11	1	2
HA-middle	77	25	6	3	2
HA-end	59	19	3	2	3
OPTI-middle	43	16	8	2	2
OPTI-end	37	27	12	2	8

Tableau 3–3 : Résultats de l'analyse microbiologique des cycles de filtration avec un dosage des eaux usées à 1:250.

Tableau 3–4 : Résultats de l'analyse microbiologique des cycles de filtration avec un dosage des eaux usées à 1:125.

sampling point	colony count (20°C) [cfu/ml]	coliforms [MPN/ 100 ml]	E. coli [MPN/ 100 ml]	Enterococci [cfu/100 ml]	Clostridium perfiringens [cfu/100 ml]
influent A	184	2	0	0	3
influent B	74	12	0	0	0
HA-middle	48	10	2	0	0
HA-end	53	14	1	0	3
OPTI-middle	41	11	2	0	3
OPTI-end	38	4	2	0	2

## 4. Résultats des cycles de filtre avec rétrolavage à l'eau et à l'air

#### 4.1 Informations générales

Durant les premiers cycles de filtre, les différences entre FILTRALITE MC et Hydroanthrasit H étaient évidentes, mais ont fini par disparaître après quatre cycles. Ce phénomène peut s'expliquer par le blocage des pores du Filtralite par des précipités d'hydroxyde d'aluminium non éliminés au rétrolavage. Nous avons donc décidé de réaliser trois cycles de filtre supplémentaires avec un rétrolavage à l'air.



#### 4.2 Résultats

Comme pour les cycles de filtre avec rétrolavage à l'eau uniquement, l'élimination intégrée (ou cumulative) de la de turbidité pour les filtres avec FILTRALITE MC et Hydroanthrasit H était la même pour les deux matériaux, pour les trois cycles de filtre. La Fig. 4-1 le montre, à titre d'exemple, pour un des trois cycles.



Fig. 4-1 : Élimination intégrée de la turbidité durant un des cycles de filtre avec rétrolavage à l'air et à l'eau avant filtration

Pour le même cycle, la perte de charge totale est représentée comme étant dépendante du temps de filtration dans la Fig. 4-2. Ici aussi, la perte de charge était plus élevée, dès le départ, pour l'Hydroanthrasit H que pour FILTRALITE MC. Pour les deux filtres, la perte de charge initiale est inférieure de 5 mbar environ à celle relevée pour les cycles de filtre avec rétrolavage à l'eau (comparer avec les Fig. 3-10 et 3-11). Cela peut résulter d'une meilleure élimination des matières déposées et/ou des abrasifs des médias filtrants, suite au rétrolavage à l'air. Néanmoins, les différences absolues entre Hydroanthrasit H et FILTRALITE MC restent pour la plupart les mêmes, en ce que l'Hydroanthrasit H entraîne une plus grande perte de charge. En cas d'extrapolation par rapport à un critère de rétrolavage de 120 mbar, un filtre avec FILTRALITE peut fonctionner plus longtemps qu'un filtre avec Hydroanthrasit H. L'augmentation de la durée de fonctionnement est également d'environ 25 %.

La raison aux meilleures performances de FILTRALITE peut être l'abrasion de petites particules provenant du charbon actif, comme Hydroanthrasit H. Cependant, il faut prendre en considération le fait que la couche filtrante la plus élevée n'a pas été grattée avant la mise en fonctionnement des filtres. Toutefois, d'après les recherches effectuées, les performances à long terme de FILTRALITE, comparées à celles d'Hydroanthrasit H, ne sont pas claires. Il est prévu que FILTRALITE résiste plus longtemps en raison de sa plus grande résistance à l'abrasion. Cela ne peut toutefois pas être prouvé par les études menées jusqu'à présent.



D U I S B U R G E S S E N



Fig. 4-2 : Perte de charge totale en fonction du temps de filtration durant un des cycles de filtre avec rétrolavage à l'air et à l'eau avant filtration.

### 5. Résumé et conclusions

Dans des conditions contrôlées, les deux matériaux filtrants FILTRALITE MC (fourni par OPTIROC) et Hydroanthrasit H (fourni par Akdolit) ont été comparés lors de la filtration d'une eau de surface synthétique. L'eau de surface a été préparée à partir d'eau potable déchlorurée à laquelle ont été ajoutés des particules d'argile et des effluents d'usine de traitement des boues activées, de telle sorte que la turbidité et la contamination microbienne soient comparables, en moyenne, à celles de la rivière Ruhr, en Allemagne.

Avant filtration, l'eau a été traitée par floculation avec du chlorure de polyaluminium dans trois chambres de floculation disposées en série.

Les deux matériaux à comparer ont été versés dans des colonnes filtrantes de 2,5 m de hauteur et de 255 mm de diamètre interne. Les filtres étaient des médias bicouche, la hauteur totale du lit était de 150 cm avec 70 cm de sable et 80 cm d'Hydroanthrasit H ou de FILTRALITE MC. La granulométrie hydraulique réelle des deux médias était d'1,9 mm environ et celle du sable de 0,9 mm environ. Entre les cycles de filtre, les filtres ont été nettoyés par rétrolavage. Pour la plupart des expériences, les filtres ont été rétrolavés à l'eau seulement à 65 m/h pendant 30 min. Pour certaines expériences, les filtres ont d'abord été rétrolavés à l'air, à 60 m/h, puis à l'eau.

En ce qui concerne l'élimination de la turbidité, FILTRALITE et Hydroanthrasit H ont donné des performances égales. Les performances légèrement meilleures de FILTRALITE durant les trois premiers cycles ne se sont pas poursuivies, sans doute en raison du blocage des pores qui procuraient au début de l'expérience un volume de stockage supplémentaire pour les particules.

Quant à la perte de charge, le filtre FILTRALITE a enregistré une meilleure performance que le filtre Hydroanthrasit H. Une analyse plus précise de la perte de charge incrémentielle des quatre



segments des couches filtrantes a démontré que la principale différence provenait des quelques premiers centimètres à la surface du lit. Ce résultat est même resté identique lorsque les filtres ont été rétrolavés à l'air plutôt que seulement à l'eau. Une séparation granulométrique plus nette de l'Hydroanthrasit H semble en être la raison. En outre, Hydroanthrasit H est finalement abrasé par le rétrolavage dans une plus grande mesure que FILTRALITE. Néanmoins, il convient de noter que les couches d'Hydroanthrasit H et de FILTRALITE n'ont pas été grattées avant leur mise en service, OPTIROC n'ayant pas fourni de média filtrant supplémentaire.

Pour des filtres subissant la même préparation et la même utilisation que lors de nos recherches, avec un critère de rétrolavage de 120 mbar et une perte de charge totale, des cycles de filtre 25 % plus longs avec FILTRALITE que ceux enregistrés avec Hydroanthrasit H sont possibles.

Il est probable que le principal avantage de FILTRALITE soit sa plus haute résistance à l'abrasion, ce qui permettrait des temps d'application plus longs dans les filtres grandeur nature. Toutefois, l'abrasion doit être comparée dans des expériences distinctes. De même, des études scientifiques grandeur nature sont absolument nécessaires pour prouver réellement la supériorité de FILTRALITE dans des conditions pertinentes pour la pratique.

Dr.-Ing. Wolfgang Uhl Université de Duisburg-Essen Institute for Energy- and Environmental Process Engineering (EUT) (Institut pour l'ingénierie des processus énergétiques et environnementaux) Département des technologies de l'eau