

Évaluation technique de filières tertiaires pour la réutilisation des eaux usées traitées

■ E. CARRÉ^{1,2}, J. PÉROT¹, V. JAUZEIN¹, L. LIN², M. LOPEZ-FERBER²

Mots-clés : réutilisation des eaux usées traitées (REUT), filtration sur sable, ultrafiltration, désinfection UV
Keywords: wastewater reuse, sand filtration, ultrafiltration, UV disinfection

Introduction

Selon le Programme des Nations unies pour l'environnement, une personne sur trois vivra dans une région soumise à un stress hydrique à l'horizon 2025 [PNUE, 2008]. Les principaux facteurs d'apparition du stress hydrique sont la densité de population, l'industrialisation, les pratiques agricoles et l'urbanisation. La région du bassin méditerranéen est particulièrement concernée par cette problématique, accentuée par le réchauffement climatique. Dans les zones touristiques, la pression sur la ressource en eau peut induire une concurrence entre les usages pour l'eau potable, les usages récréatifs (piscines, irrigation d'espaces verts...) et les usages agricoles [AFD, 2012]. Cette concurrence peut aussi amener à mobiliser des eaux de qualité moindre mais disponibles en plus grande quantité, ce qui nécessite des traitements supplémentaires. Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) peut constituer une ressource en eau alternative, d'autant plus que les volumes disponibles sont directement liés à la taille de la population raccordée au système d'assainissement. En pratique, la REUT répond à deux objectifs souvent liés [AFD, 2012 ; CONDOM *et al.*, 2012] :

- un objectif quantitatif : protection des ressources en eau de haute qualité pour la production d'eau potable et création de nouvelles ressources pour le développement économique (tourisme, agriculture) ;
- un objectif qualitatif : protection du milieu récepteur, en particulier lorsqu'il constitue un enjeu environnemental et/ou économique (zones de baignade).

Les techniques membranaires (bioréacteurs à membranes, ultrafiltration) ont démontré leur efficacité pour l'élimination des micro-organismes pathogènes qui est l'objectif principal des traitements en vue de la réutilisation [GRESLE *et al.*, 2007]. Néanmoins, ces techniques sont difficilement transposables dans le cadre de la majorité des projets de REUT dans le bassin méditerranéen, qui sont caractérisés par leur petite taille et par l'usage agricole des eaux traitées. Pour garantir le succès de tels projets, les techniques de traitement des eaux mises en œuvre doivent permettre d'atteindre les normes fixées pour la protection des usagers à un faible coût d'investissement et de maintenance, et nécessiter peu de compétences pour la maintenance [BRISSAUD, 2008]. Les deux filières de traitement tertiaires les plus répandues pour un usage agricole sont la combinaison filtration en profondeur + désinfection (UV ou chlore) et les systèmes extensifs (lagunage, lits plantés) [DE KONING *et al.*, 2007]. Néanmoins, les systèmes extensifs ne garantissent pas le respect des exigences de qualité pour une irrigation sans restrictions du fait de la dépendance aux facteurs climatiques et parce que des phénomènes de recontamination sont possibles [EL HAÏTE, 2010].

La convergence des réglementations internationales est également un challenge important pour étendre le développement de la REUT. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) définit un cadre pour l'utilisation sans risque des eaux usées en se basant sur l'évaluation quantitative des risques microbiens [OMS, 2006]. Les textes existants définissent pour la plupart des niveaux de qualité correspondant à des usages autorisés [SANZ et GAWLIK, 2014].

¹ Saur – Direction R&D – 2, rue de la Bresle – 78310 Maurepas.

² Laboratoire du génie de l'environnement industriel – École des mines d'Alès – 6, avenue de Clavières – 30319 Alès cedex.

Un processus de normalisation est actuellement en cours à l'échelle internationale, avec une première norme publiée pour l'utilisation des eaux usées traitées en irrigation [ISO, 2015]. En France, la REUT est autorisée pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts par l'arrêté du 2 août 2010 modifié le 25 juin 2014 [JORE, 2014]. L'instruction interministérielle du 26 avril 2016 précise les modalités d'application de cet arrêté [DGS, 2016]. Quatre classes de qualité des eaux sont définies en fonction de la sensibilité des usages prévus. Les indicateurs de qualité retenus sont les matières en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO), et quatre indicateurs de contamination fécale : *Escherichia coli*, entérocoques, phages ARN-F spécifiques et spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices (BASR) (tableau I). Les autres pays du bassin méditerranéen mettent en œuvre des réglementations similaires, bien que les seuls indicateurs microbiologiques pris en compte soient le plus souvent *E. coli* et les œufs d'helminthes [SANZ et GAWLIK, 2014].

Dans ce contexte, le projet Nowmma (*new process for optimizing wastewater reuse from Mauguio to the Mediterranean area in support of the French reuse directive*) a pour objectif principal de finaliser le développement et de démontrer l'efficacité de filières de REUT adaptées au contexte du bassin méditerranéen.

Le périmètre d'étude comprend les procédés de traitement, le stockage et les procédés d'irrigation. Les filières de traitement développées prennent en compte les contraintes technologiques, économiques et de maîtrise du risque sanitaire liées à une utilisation en irrigation dans le cadre réglementaire de l'arrêté français du 2 août 2010 modifié le 25 juin 2014. Deux filières sont ainsi étudiées :

- filière « ultrafiltration – stockage »,
- filière « filtration sur sable – stockage puis désinfection par ultraviolets (UV) » : cette configuration désigne l'association d'un stockage en cuve et d'un réacteur UV en ligne en aval.

Cet article vise à présenter une évaluation technique des filières optimisées de traitement et de stockage étudiées, en prenant en compte trois aspects :

- les performances épuratoires et la constance de la qualité d'eau obtenue, que ce soit pour les paramètres physico-chimiques ou microbiologiques ;
- la facilité d'exploitation ;
- l'adéquation avec les usages visés.

1. Matériel et méthodes

1.1. Présentation du site d'étude

La plateforme expérimentale installée dans le cadre du projet Nowmma est raccordée à la station

Paramètre	Unité	Qualité A	Qualité B	Qualité C	Qualité D
Physico-chimie					
MES	mg/L	< 15	< 35 ou abattement > 90 %*		
DCO	mg/L	< 60	< 125 ou abattement > 75 %*		
Microbiologie					
<i>Escherichia coli</i>	log UFC/100 mL	≤ 2,4	≤ 4	≤ 5	–
	UFC/100 mL	≤ 250	≤ 10 000	≤ 100 000	–
Entérocoques fécaux	Abattement	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
	en log				
Bactériophages ARN-F spécifiques	Abattement	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
	en log				
Spores BASR	Abattement	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
	en log				

MES : matières en suspension ; DCO : demande chimique en oxygène ; BASR : bactéries anaérobies sulfite-réductrices ; UFC : unité formant colonie.

*Spécifique à la station d'épuration étudiée.

Tableau I. Niveaux de qualité requis par la réglementation française pour la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures ou d'espace verts. Les abattements sont calculés entre l'entrée de la station et la sortie des traitements

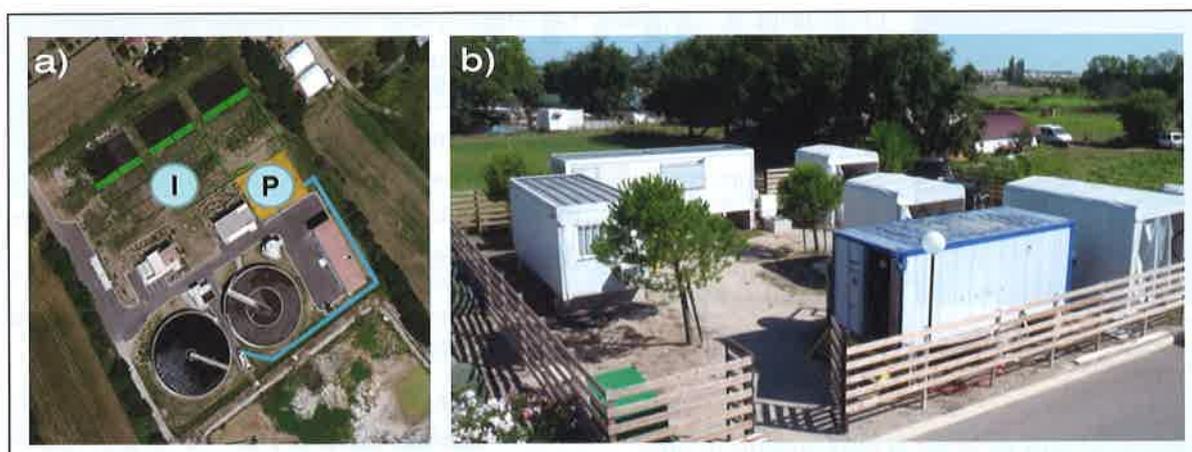


Figure 1. a) Implantation de la plateforme expérimentale au sein de la station d'épuration (STEP) de Mauguio. P désigne les installations de traitement (b) et I la parcelle d'irrigation. Le trait bleu représente la canalisation d'amenée de l'effluent secondaire du canal venturi de la STEP vers la plateforme

d'épuration (STEP) de Mauguio (34) (figure 1). Cette station a été mise en service en 2008. Elle a une capacité de 24 000 équivalent-habitant (EH). Les niveaux de rejet définis par arrêté préfectoral nécessitent un traitement de l'azote et du phosphore, tel que prévu par la réglementation dans le cadre d'un rejet en zone sensible. Le traitement est composé des étapes principales suivantes :

- dégrillage/tamisage ;
- déshuilage/dessablage ;
- bassin d'aération constitué d'une zone anaérobie, d'une zone d'anoxie et d'une zone d'aération avec injection de chlorure ferrique ;
- dégazage ;
- clarification.

1.2. Présentation des filières étudiées

1.2.1. Filière « Ultrafiltration »

Cette filière a été exploitée sur une période de douze semaines environ, entre le 3 juin 2014 et le 29 août 2014 pendant la saison d'irrigation. La représentation schématique de la filière est donnée en figure 2. Les effluents sont prétraités par deux tamis successifs à 2 500 et à 200 μm avant d'être envoyés vers le pilote d'ultrafiltration. Ce pilote est constitué de deux modules de membranes à fibres creuses en polyéther sulfone (X-Flow, Pentair, Pays-Bas). Chaque module, d'un diamètre de 20 cm et d'une longueur de 1,5 m, contient 11 000 fibres pour une surface de filtration de 40 m^2 . Le diamètre de chaque fibre est de 0,8 mm

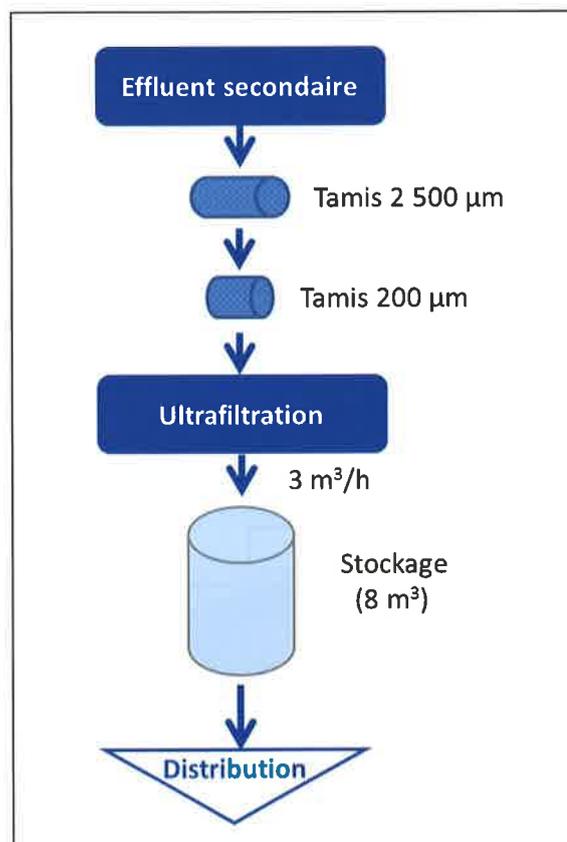


Figure 2. Représentation schématique de la filière « ultrafiltration »

pour une porosité de 0,025 μm (figure 3). Il faut noter que l'ultrafiltration a été exploitée en mode dégradé pendant la saison d'irrigation étudiée : un test d'intégrité a mis en évidence la détérioration de deux fibres sur un module. Ce fonctionnement en mode dégradé a été maintenu pour étudier les performances du procédé dans cette configuration.



Source : X-Flow
Figure 3. Vue en coupe d'un module d'ultrafiltration

Les principaux équipements mécaniques du pilote sont une pompe centrifuge d'alimentation, une pompe centrifuge de lavage et un compresseur pour l'injection d'air. Les principaux équipements de mesure sont deux débitmètres pour les eaux

brutes et les eaux de lavage et deux capteurs de pression (eau brute et eau traitée). Des pompes péristaltiques permettent également l'injection de réactifs (acide chlorhydrique, soude) pour le lavage des membranes. L'alimentation se fait par le bas du module et la filtration est frontale de l'intérieur vers l'extérieur de chaque fibre.

Le fonctionnement du pilote est géré par un automate intégré. Pendant la phase de production du filtre, le débit d'alimentation est fixé à $3 \text{ m}^3/\text{h}$, soit un flux de $37,5 \text{ L/h}\cdot\text{m}^2$ (flux constant). La durée d'un cycle est fixée à 20 minutes pour limiter l'augmentation de la pression transmembranaire. Plusieurs types de lavages hydrauliques ou chimiques permettent de contrôler la perméabilité pour maintenir un fonctionnement optimal.

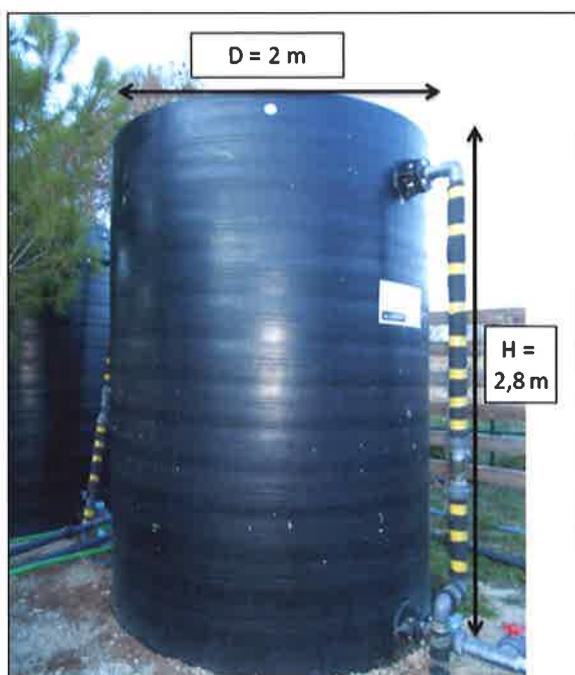


Figure 4. Cuve de stockage en polyéthylène haute densité PEHD

Les effluents sont ensuite dirigés vers une cuve de stockage cylindrique en polyéthylène haute densité (PEHD) de 2,8 m de hauteur et de 2 m de diamètre, soit un volume utile de 6 m^3 (figure 4). Le remplissage s'effectue à partir du trop-plein de la cuve d'eau traitée du pilote d'ultrafiltration en 2 heures environ (alimentation par le haut).

1.2.2. Filière « filtration sur sable – stockage puis désinfection »

Cette filière a été exploitée sous deux configurations différentes pendant les campagnes d'irrigation 2014 et 2015. En 2014, la filière a été exploitée sur une période de 12 semaines, entre le 3 juin 2014 et le 30 août 2014. En 2015, la filière a été exploitée sur une période de 8 semaines, entre le 30 juin 2015 et le 25 août 2015. La représentation schématique de chaque configuration est présentée en figure 5. Les effluents sont prétraités par un tamis à $2\ 500 \text{ m}$ (§ 3.1) avant d'être envoyés vers le pilote de filtration sur sable. Ce pilote est constitué d'un corps de filtre en fibre de verre d'une hauteur utile d'un mètre pour une surface de $1,05 \text{ m}^2$ (Calplas, Espagne) (figure 6). Les principaux équipements mécaniques du pilote sont une pompe centrifuge d'alimentation, une pompe centrifuge de lavage et une soufflante pour l'injection d'air à contre-courant. Les principaux équipements de mesure sont deux débitmètres pour les eaux brutes et les eaux traitées et un capteur de pression différentielle pour asservir le lavage du filtre. Les deux configurations pour cette filière sont les suivantes :

- 2014 : filière type « affinage des effluents secondaires » : sable grossier (taille effective nominale ou TEN de 1,4 mm) ;
- 2015 : filière optimisée pour la réutilisation : sable fin (TEN de 0,99 mm) et injection de chlorure ferrique à 2 ppm de solution commerciale (40 % de FeCl_3) en amont de la pompe d'alimentation.

Le fonctionnement du pilote est géré par un automate intégré. Pendant la phase de production du filtre, le débit d'alimentation est fixé à $10 \text{ m}^3/\text{h}$, soit une vitesse de $9,5 \text{ m/h}$. La durée d'un cycle est asservie soit à la consigne (24 h), soit à la différence de pression entre l'amont et l'aval du filtre, qui ne doit pas dépasser 0,3 bar. Le lavage du filtre consomme

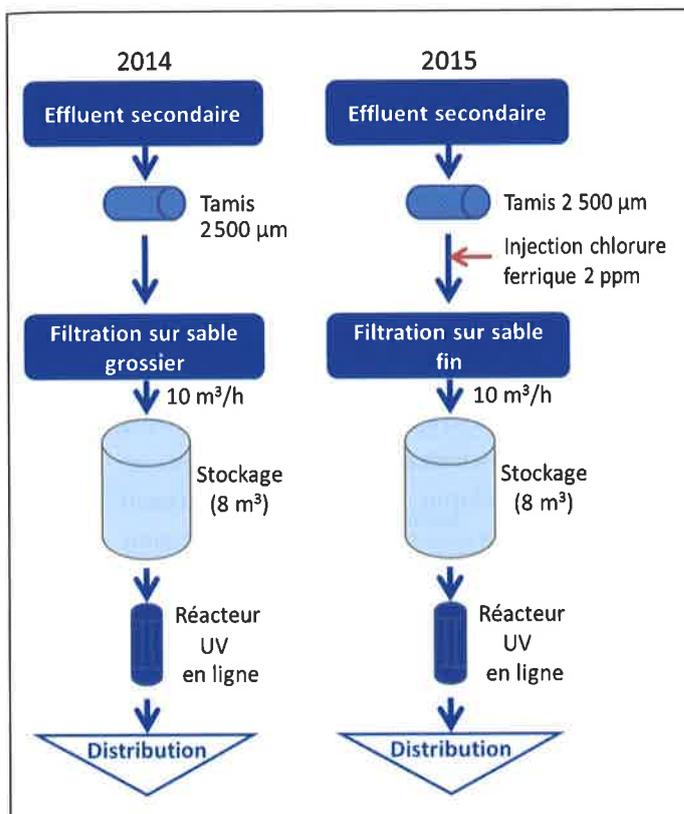


Figure 5. Représentation schématique des deux configurations de la filière « Filtration sur sable – stockage puis désinfection » exploitées en 2014 et en 2015

environ 6,8 m³ d'eau et se déroule selon les étapes présentées dans le *tableau II*.

Les effluents en sortie du filtre à sable sont dirigés vers une cuve de stockage cylindrique en PEHD (*figure 4*). Le remplissage s'effectue à partir du trop-plein de la cuve de lavage du filtre à sable en 40 minutes environ. Le volume de la cuve est adapté à la capacité de production du filtre à sable pour répondre à la demande pour l'irrigation en aval (4 à 6 m³ deux fois par jour). Lors de l'irrigation, l'eau est



Figure 6. Pilote de filtration sur sable

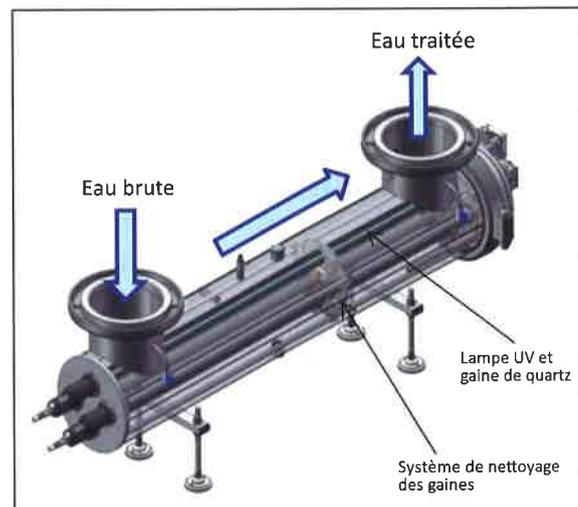


Figure 7. Schéma du réacteur UV en ligne (Bio-UV, France)

	1 Abaissement du plan d'eau	2 Décolmatage	3 Contre-lavage	4 Repos et rejet des premières eaux
Durée (min)	4	7	10	12
Consommation eau brute	Oui – 1,1 m ³	Non	Non	Oui – 1,7 m ³
Consommation eau traitée	Non	Oui – 0,7 m ³	Oui – 3,3 m ³	Non
Injection d'air	Non	Oui	Non	Non

Tableau II. Déroulement du lavage du filtre à sable et volumes d'eau consommés

traitée par un réacteur UV cylindrique en Inox. En 2014, ce réacteur est constitué de cinq lampes UVc basse pression d'une puissance unitaire de 87 W (puissance électrique totale installée : 435 W) (Bio-UV, France). Il est remplacé en 2015 par un réacteur constitué de trois lampes UVc basse pression d'une puissance unitaire de 300 W (puissance électrique totale installée : 900 W) (Bio-UV, France) (figure 7). Ce réacteur est plus adapté à l'effluent (augmentation de la dose UV appliquée) et aux filières d'irrigation en aval (augmentation du débit de production).

1.3. Suivi de la qualité de l'eau

1.3.1. Paramètres physico-chimiques

Les données en entrée et en sortie de la station d'épuration sont fournies par l'autocontrôle de l'exploitant entre janvier 2013 et juin 2015. Pour le suivi du traitement tertiaire pendant la saison d'irrigation 2014, les analyses physico-chimiques ont été réalisées directement sur la plateforme expérimentale, à l'exception de la mesure du carbone organique total (COT) qui a été réalisée par un laboratoire agréé (Ianesco, France). Pour le suivi du traitement tertiaire pendant la saison d'irrigation 2015, les paramètres physico-chimiques ont été analysés par un laboratoire agréé (Ianesco, France) à l'exception du pH, de la

conductivité, de la turbidité et de la transmittance UV (tableau III). Le fer, le manganèse, l'azote total et les ions phosphate ont également été suivis sur la plateforme.

1.3.2. Paramètres microbiologiques

Les données en entrée et en sortie de la station d'épuration sont issues de cinq campagnes ponctuelles d'échantillonnage réparties entre octobre 2014 et juillet 2015. Pour le suivi du traitement tertiaire pendant la saison d'irrigation 2014, les indicateurs coliformes, *Escherichia coli* et entérocoques ont été analysés sur la plateforme. Pour le suivi du traitement tertiaire pendant la saison d'irrigation 2015 et pour tous les autres indicateurs, les analyses ont été effectuées par un laboratoire agréé (Inovalys, France) (tableau IV). Le protocole de prélèvement est le suivant : purge du robinet de prélèvement en Inox, flambage au chalumeau et collecte de l'échantillon dans le flacon stérile fourni par le laboratoire. Les *Cryptosporidium* et *Giardia* n'ont pas été recherchés pendant les saisons d'irrigation. Les paramètres « œufs d'helminthes » et « phages ARN-F spécifiques » ont été analysés pendant la saison d'irrigation 2014, mais pas pendant la saison 2015 en raison de leur absence dans la quasi-totalité des échantillons.

Paramètre	Unité	Méthode Plateforme	Méthode laboratoire agréé
pH	-	Sonde pH340* (WTW, Allemagne)	
Conductivité	µS/cm	Sonde Odeon* (Ponsel Mesure, France)	
Chlorures	mg/L		Selon NF EN ISO 15682
MES	mg/L	NF EN 872	NF EN 872
DCO	mg/L	Test LCK 414 (Hach Lange, Allemagne)	ISO 15705
COT	mg/L		NF EN 1484
Turbidité	NTU	Appareil Turb 550 IR* (WTW, Allemagne)	
TUV 254	%	Appareil DR6000* (Hach Lange, Allemagne)	

TUV : transmittance UV à 254 nm ; MES : matières en suspension ; DCO : demande chimique en oxygène ; COT : carbone organique total.

*Les appareils et sondes sont étalonnés conformément aux prescriptions des constructeurs

Tableau III. Principaux paramètres physico-chimiques étudiés et méthodes utilisées sur la plateforme expérimentale ou par le laboratoire agréé

Indicateur	Unité	Méthode Plateforme	Méthode Laboratoire agréé
Coliformes	NPP/100 mL UFC/100 mL	IDEXX Colilert	NF EN ISO 9308-1
<i>Escherichia coli</i>	NPP/100 mL		NF EN ISO 9308-3
Entérocoques	NPP/100 mL	IDEXX Enterolert	NF EN ISO 7899-1
Spores de BASR	UFC/100 mL	–	NF ISO 26461-2
Phages ARN-F spécifiques	PFU/mL	–	ISO 10705-1
Oocystes de <i>Cryptosporidium</i>	Nombre par L	–	NFT90-455 (sur 15 L)
Kystes de <i>Giardia</i>	Nombre par L		
Œufs d'helminthes	Nombre par L	–	Comptage microscope (sur 5 L)

NPP : nombre le plus probable ; UFC : unité formant colonie ; BASR : bactéries anaérobies sulfite-réductrices ; PFU : particules formant des plages de lyse.

Tableau IV. Indicateurs microbiologiques analysés et méthodes utilisées sur la plateforme expérimentale ou par le laboratoire agréé

1.3.3. Nombre de campagnes

Pour la filière avec ultrafiltration, le nombre de campagnes de mesure est au minimum de huit sur la période étudiée, et peut monter jusqu'à 35 pour certains paramètres analysés sur la plateforme. Pour la filière avec filtration sur sable, le nombre de campagnes est au minimum de neuf. En sortie de désinfection, huit campagnes ont été réalisées pour le réacteur UV en ligne.

2. Résultats

2.1. Performances épuratoires du traitement secondaire

La composition des eaux brutes et des eaux traitées de la station d'épuration est donnée dans le tableau V. L'effluent est caractéristique d'un effluent urbain, aucune industrie de taille significative n'étant raccordée au réseau d'assainissement. Aucune variabilité saisonnière n'a été mise en évidence sur la période considérée. Le rapport DCO/demande biochimique en O₂ sur 5 jours (DBO₅) égal à 3 indique une biodégradabilité de l'effluent bonne à moyenne. En ce qui concerne les indicateurs microbiologiques, la variabilité saisonnière est également faible, excepté pour les paramètres *Cryptosporidium* et *Giardia*. Sur les cinq prélèvements effectués, celui de mai 2015 présente la contamination la plus élevée en *Giardia* avec 522 oocystes par litre. Cette variabilité pourrait s'expliquer par le fait

que la présence de ce type de parasite est liée aux élevages bovins et ovins, qui sont plutôt confinés en hiver et en pâturage extensif au printemps.

Les performances de la station sont conformes aux exigences réglementaires pour l'ensemble des indicateurs physico-chimiques. Ces exigences ne prennent pas en compte les indicateurs microbiologiques. Cependant, les performances de la station au regard de ces indicateurs sont conformes aux données de la littérature relatives au traitement secondaire par boues activées [ANSES, 2012] : 1 à 3 log d'abattement pour les bactéries et virus. Pour les spores de BASR, un abattement entre 2 et 3 log est observé. La STEP permet une élimination quasi totale des phages, pour des valeurs allant jusqu'à 8 000 particules formant des plages de lyse (PFU)/mL en eau brute (tableau V). En ce qui concerne les parasites, *Cryptosporidium* est faiblement présent en sortie de STEP (0 à 0,2 oocystes par litre). *Giardia* est présent à un niveau un peu plus important (0 à 8 oocystes par litre). Les données de la littérature indiquent que ces protozoaires sont bien éliminés par les procédés de filtration [ANSES, 2012].

2.2. Performances épuratoires des filières étudiées : paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus sur les filières étudiées pour les paramètres MES, DCO, turbidité et transmittance UV

Paramètre	Unité	Entrée STEP		Sortie STEP		Abattement moyen*
		Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	
Physico-chimie						
DBO ₅	mg/L	298,2	119,6	2,5	5,0	99 %
DCO	mg/L	775,2	215,9	21,3	18,1	97 %
MES	mg/L	360,0	151,9	6,7	11,8	98 %
NGL	mg/L	67,5	17,1	5,8	3,7	91 %
Pt	mg/L	7,0	1,5	0,9	0,9	87 %
Microbiologie						
Coliformes	log UFC/100 mL	7,6	0,4	5,0	0,8	2,8 log
<i>Escherichia coli</i>	log UFC/100 mL	7,3	0,5	4,3	0,7	2,9 log
Entérocoques	log UFC/100 mL	6,5	0,6	3,1	0,8	3,2 log
Bactériophages ARN-F spécifiques	PPF/mL	5 420	1 901	0	1	3,7 log
Spores BASR	log UFC/100 mL	5,0	0,4	3,8	0,7	2,3 log
Flore totale revivifiable à 36 °C	log UFC/100 mL	8,2	0,1	5,2	0,9	3,0 log
Flore totale revivifiable à 22 °C	log UFC/100 mL	8,0	0,3	5,5	0,9	2,6 log
<i>Cryptosporidium</i>	Oocystes/L	1,6	2,0	0,2	0,2	–
<i>Giardia</i>	Oocystes/L	167	201	2,9	3,0	–
Oeufs d'helminthes	Nombre/L	Absence (5 analyses)		Absence (5 analyses)		–
DBO ₅ : demande biologique en oxygène sur 5 jours ; DCO : demande chimique en oxygène ; MES : matières en suspension ; NGL : azote global ; Pt : phosphore total ; UFC : unité formant colonie ; BASR : bactéries anaérobies sulfite-réductrices.						

*Moyenne des abattements calculés pour chaque couple de mesures :

– pour la physico-chimie : (%) = $(C_{\text{entrée}} - C_{\text{sortie}}) / C_{\text{entrée}} \times 100$ avec C exprimé en mg/L ;

– pour la microbiologie : (log) = $C_{\text{entrée}} - C_{\text{sortie}}$ avec C exprimé en log UFC par unité de volume.

Tableau V. Composition moyenne des eaux brutes et des eaux traitées de la station d'épuration (STEP) de Mauguio. Pour la physico-chimie, les données sont issues de l'autocontrôle entre janvier 2013 et juin 2015, avec une analyse par mois pour les paramètres NGL et Pt ; et deux analyses par mois pour les autres paramètres. Pour la microbiologie, les données sont issues de 10 campagnes d'analyses ponctuelles réparties entre octobre 2014 et juillet 2015

à 254 nm sont présentés dans la figure 8. La qualité de l'effluent ne varie pas de façon significative pendant le traitement tertiaire pour les autres paramètres étudiés. Le pH est neutre ($7,5 \pm 0,4$). La conductivité est égale à $1\,400 \pm 100$ µS/cm et la teneur en ions chlorure à 200 ± 25 mg/L. Les variations en sortie de traitement sont liées aux variations dans l'effluent secondaire, car les espèces ioniques ne sont pas éliminées par les procédés de filtration étudiés. La présence de sels dissous dans l'eau d'irrigation peut avoir un impact négatif selon la sensibilité de la culture et la nature des sols. Néanmoins, le seuil de tolérance de la plupart des cultures est au-delà de 2 000 µS/cm [JIMÉNEZ-CISNEROS, 2014]. Les

concentrations en azote et phosphore sont équivalentes aux valeurs trouvées en sortie du traitement secondaire (tableau V). La demande chimique en oxygène (DCO) et le carbone organique total (COT) sont peu touchés par les procédés mis en œuvre dans les filières étudiées. La pollution organique résiduelle en sortie du traitement secondaire est donc majoritairement sous forme dissoute.

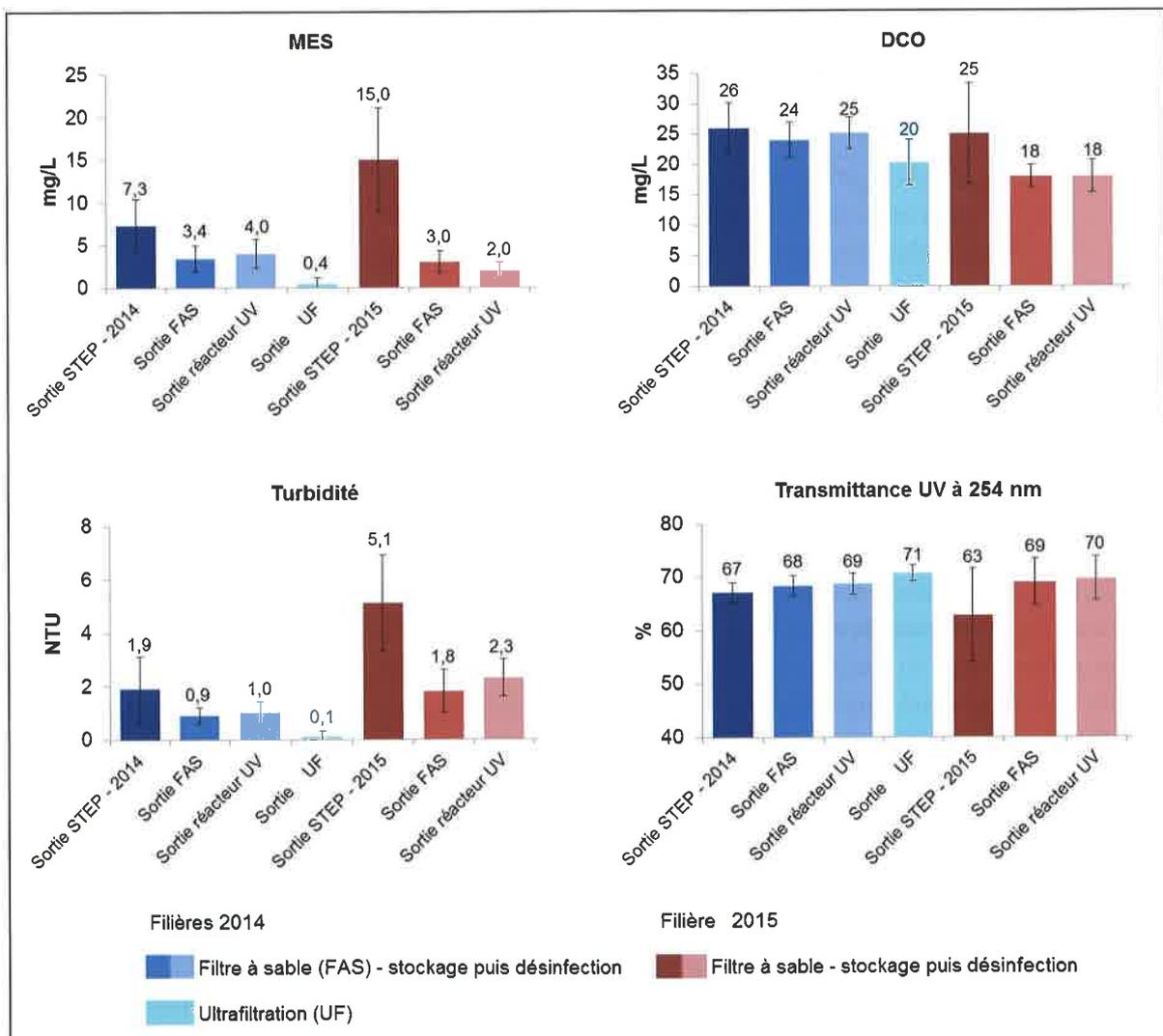
Ultrafiltration permet d'atteindre une très bonne qualité d'eau en sortie, même avec une casse de deux fibres (0,009 % des fibres installées) : teneur en MES inférieure à 4 mg/L, turbidité inférieure à 1 NTU, et transmittance UV à 254 nm aux environ de 70 % (figure 8). Si l'intégrité de l'ensemble des fibres avait

été maintenue, la qualité d'eau aurait été encore améliorée, avec des valeurs de turbidité inférieures à 0,1 NTU [GRESLE *et al.*, 2007].

L'impact du filtre à sable s'observe surtout sur les paramètres MES, turbidité et transmittance UV à 254 nm. Ces paramètres sont des indicateurs de la teneur en particules et colloïdes dans l'eau. Malgré une dégradation de qualité observée sur l'effluent secondaire pendant la saison d'irrigation 2015 par rapport à l'année 2014, la qualité de l'effluent filtré est maintenue grâce au rôle « tampon » du filtre à sable : teneur en MES inférieure à 10 mg/L, turbidité proche de 2 NTU, DCO inférieure ou égale à 20 mg/L, et transmittance UV à 254 nm supérieure à 65 % (figure 8).

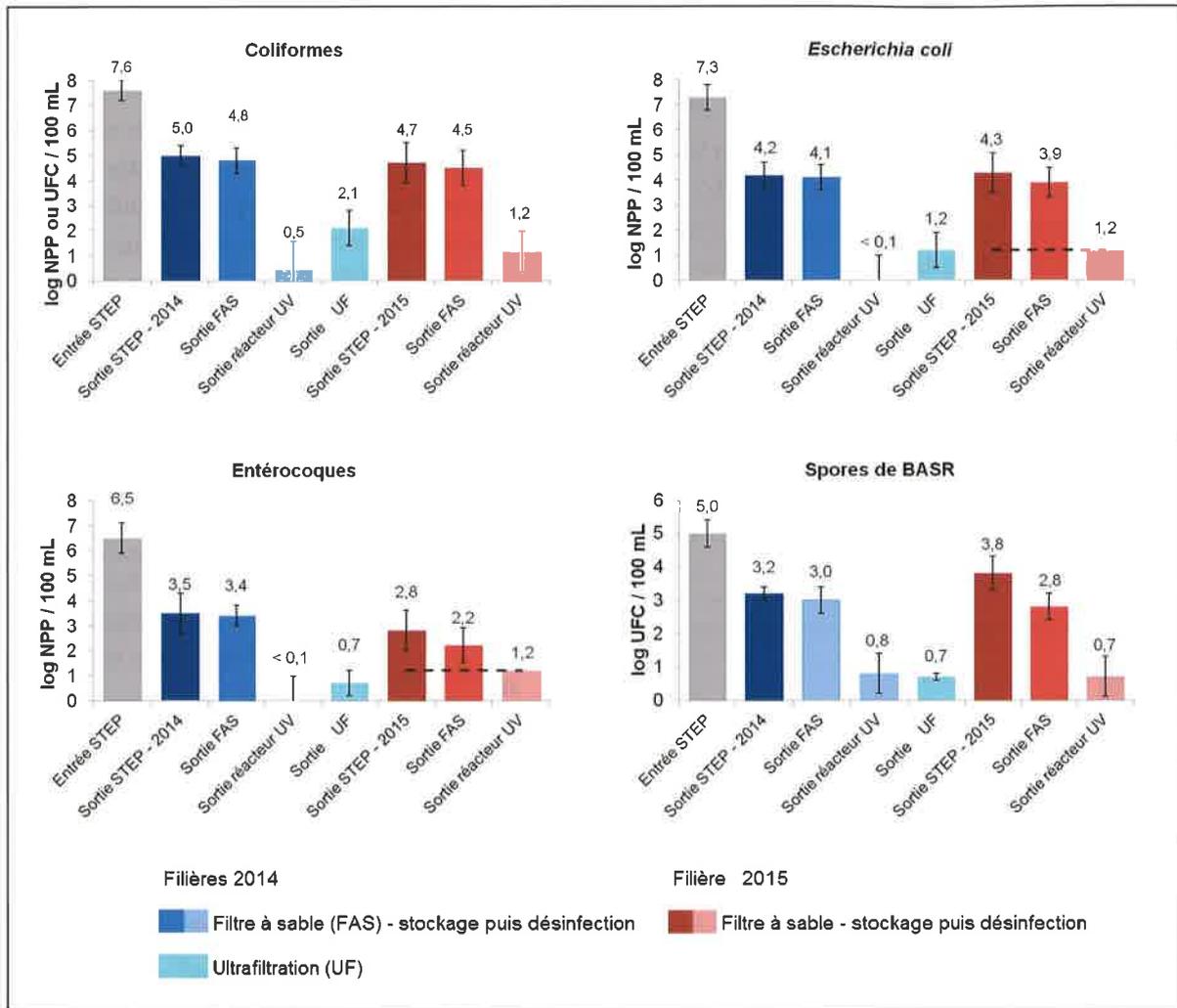
Le filtre à sable démontre donc sa capacité à maintenir un faible niveau de pollution particulaire, ce qui est important pour garantir l'efficacité de la désinfection UV. La configuration avec le sable grossier sans injection de chlorure ferrique permet d'atteindre la qualité attendue avec les effluents secondaires traités en 2014. Pour des effluents secondaires plus chargés tels que ceux étudiés en 2015, le changement de sable ainsi que l'injection de chlorure ferrique peut expliquer le maintien en qualité de l'eau filtrée.

La teneur en manganèse de l'effluent est très faible (0,04 mg/L), ainsi que la teneur en fer (0,07 mg/L). L'injection de chlorure ferrique en entrée du filtre à sable (configuration 2015) provoque une augmentation



MES : matières en suspension ; DCO : demande chimique en oxygène.

Figure 8. Résultats du suivi des filières étudiées pour les paramètres MES, DCO, turbidité et transmittance UV à 254 nm (les barres représentent l'écart-type par rapport à la moyenne).



STEP : station d'épuration ; NPP : nombre le plus probable ; UFC : unité formant colonie.

Figure 9. Résultats du suivi des filières étudiées pour les indicateurs coliformes, *Escherichia coli*, entérocoques et spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices (BASR). Les pointillés représentent la limite de quantification pour les analyses réalisées en 2015 (les barres représentent l'écart type par rapport à la moyenne)

de la teneur en fer jusqu'à 0,3 mg/L, majoritairement sous forme particulaire, car la mesure sur l'effluent filtré à 0,45 µm est stable (0,07 mg/L). La concentration en fer en sortie du filtre à sable est proche des valeurs mesurées avant l'injection du coagulant (0,1 mg/L), ce qui indique une bonne rétention des floccs. Le contrôle des teneurs en fer est important pour la désinfection UV, car le fer absorbe les rayonnements ultraviolets et diminue ainsi l'efficacité de la désinfection [LINDEN et ROSENFELDT, 2011].

2.3. Performances épuratoires des filières étudiées : indicateurs microbiologiques

Les résultats obtenus sur les filières étudiées pour les indicateurs coliformes, *Escherichia coli*, entérocoques

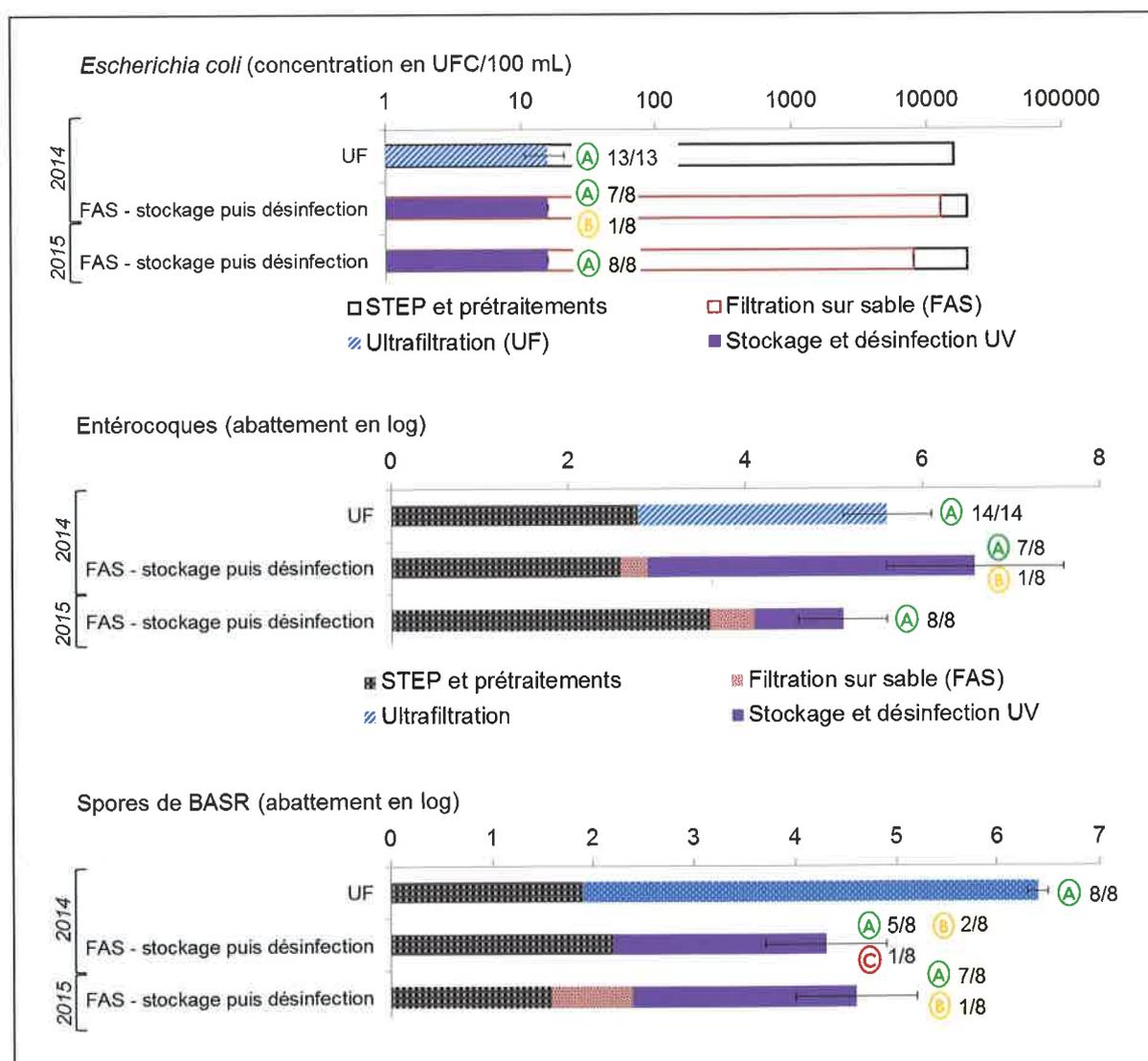
et spores de BASR sont présentés dans la figure 9. Grâce à son seuil de coupure très bas, l'ultrafiltration permet de retenir la plus grande partie des micro-organismes. Si les membranes sont intègres, des abattements de 6 log pour les bactéries et 4 log pour les virus peuvent être atteints [ANSES, 2012 ; GRESLE *et al.*, 2007]. Avec deux fibres endommagées sur un des deux modules d'ultrafiltration exploités (11 000 fibres par module), un résiduel de 0 – 1 log est observé en sortie de traitement pour *Escherichia coli*, les entérocoques et les spores de BASR (figure 9). Les valeurs sont plus importantes pour les coliformes, mais les valeurs restent en deçà de 2,2 log UFC/100 mL.

Le filtre à sable présente des abattements compris entre 0,2 et 1 log selon les indicateurs considérés

(figure 9). Ces résultats sont en accord avec les précédentes études réalisées sur des équipements similaires [ANSES, 2012]. Pour la filière avec stockage puis désinfection, la qualité biologique de l'effluent n'est pas significativement modifiée pendant le stockage. En effet, la faible teneur en nutriments (DBO_5 inférieure à 3 mg/L) et les conditions de stockage en cuve fermée sont des facteurs limitants au développement des micro-organismes. En sortie du réacteur de désinfection UV, une élimination quasi complète de *E. coli*, des entérocoques et des spores de BASR est atteinte (figure 9).

2.4. Positionnement des filières étudiées par rapport à la réglementation française

Les niveaux de qualité requis pour les usages autorisés en France sont définis par l'arrêté du 2 août 2010 modifié le 25 juin 2014 [JORF, 2014]. Ils sont présentés dans le *tableau I*. La sortie de la filière de traitement est définie comme point de référence pour vérifier ces niveaux de qualité, conformément à la réglementation [DGS, 2016]. Pour les paramètres physico-chimiques, l'arrêté préconise au minimum le respect des niveaux de rejet imposés par l'arrêté préfectoral spécifique à la station d'épuration. Cet arrêté fixe une valeur



UF : ultrafiltration ; FAS : filtre à sable ; UFC : unité formant colonie ; STEP : station d'épuration. Les barres correspondent aux écarts types par rapport aux valeurs moyennes en sortie de chaque filière. Les scores indiqués correspondent au nombre de campagnes conformes aux niveaux de qualité (A, B, C) définis par la réglementation.

Figure 10. Positionnement des filières étudiées par rapport à la réglementation française pour les paramètres *Escherichia coli* (concentration en sortie de chaque étape du traitement), entérocoques et spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices (BASR) (abattement après chaque étape de traitement)

maximale pour la DCO à 125 mg/L, mais en pratique les valeurs relevées en sortie de station d'épuration sont toujours inférieures à 50 mg/L (tableau I). Le niveau de qualité A pour la réutilisation est donc atteint pour ce paramètre. Pour les MES, la valeur limite pour la station d'épuration est de 35 mg/L. Les valeurs relevées en sortie de traitement secondaire sont le plus souvent inférieures à 15 mg/L, et les étapes de filtration tertiaire étudiées (filtre à sable et ultrafiltration) permettent de garantir le respect du niveau de qualité A pour ce paramètre (figure 8).

Pour les paramètres « *Escherichia coli* », « entérocoques » et « spores de BASR », l'ultrafiltration permet d'atteindre le niveau de qualité A même avec un fonctionnement en mode dégradé. La filière associant le filtre à sable et le réacteur UV après stockage permet également d'atteindre le niveau de qualité A pour ces paramètres, avec un dépassement pour le paramètre « spores de BASR » pour la configuration exploitée en 2015 (figure 10). Globalement, les performances sont plus faibles pour la configuration exploitée en 2014, ce qui justifie la mise en place d'un réacteur UV plus adapté à l'effluent en 2015.

Pour le paramètre « bactériophages ARN-F spécifiques », la station d'épuration de Mauguio est confrontée à des eaux brutes faiblement chargées, et les phages sont quasi absents en sortie de traitement secondaire. L'application de l'arrêté du 2 août 2010 modifié le 25 juin 2014 conduit au classement des eaux dans le niveau de qualité B, l'élimination des bactériophages ARN-F spécifiques par la station d'épuration correspondant à un abattement inférieur à 4 log (tableau I). La circulaire du 26 avril 2016 permet le classement dans le niveau de qualité A pour des concentrations inférieures à 10 PFP/mL, ce qui correspond à ce cas de figure [DGS, 2016].

3. Bilan d'exploitation

3.1. Maintenance

Pendant les saisons d'irrigation (mai à octobre), une prolifération d'algues filamenteuses a été observée sur la goulotte du clarificateur de la station d'épuration. Cette problématique pourrait être rencontrée dans de nombreuses stations d'épuration dès que les conditions de prolifération des algues (soleil, chaleur) sont



Figure 11. Colmatage du tamis (seuil de coupure à 2 500 µm) après 12 h de fonctionnement en période estivale

réunies. Le décrochage régulier de ces algues pose des problèmes sur le traitement tertiaire : encrassement des pompes, colmatage rapide du filtre à sable... Comme le point de pompage des effluents secondaires n'a pu être modifié pendant la phase d'exploitation des pilotes, la solution retenue a été la mise en place d'un tamis (seuil de coupure à 2 500 µm) à nettoyage manuel en amont de la cuve de répartition des eaux secondaires vers le traitement tertiaire. Cette solution n'est pas idéale, car le tamis se colmate rapidement (figure 11). Cette problématique de prolifération d'algues doit être prise en compte pour déterminer le positionnement de la prise d'eau lors de la mise en œuvre à l'échelle industrielle afin d'éviter la mise en place de ce type de prétraitement. L'exploitation des modules d'ultrafiltration demande une maintenance importante en routine. Des précautions particulières doivent être prises pour le stockage des réactifs (acide, soude, Javel, chlorure ferrique) : stockage confiné et ventilé dans deux espaces différents et avec des bacs de rétention, port des équipements de protection individuelle. Par ailleurs, des lavages chimiques complets peuvent être réalisés manuellement en cas de colmatage trop important des membranes (au bisulfite, par exemple). Enfin, un contrôle régulier de l'intégrité des membranes est nécessaire : cela consiste à démonter le module et à le mettre sous pression d'air pour détecter les fuites et les réparer.

En ce qui concerne le filtre à sable, la gestion des stocks de réactifs est également à prévoir en cas d'injection de chlorure ferrique en amont du filtre. Le sable est changé tous les 5 à 10 ans selon son encrassement.

Le système de désinfection UV nécessite des contrôles de routine (vérification de l'état des lampes et des équipements mécaniques, nettoyage du capteur de rayonnement UV). Le renouvellement des

lampes est prévu selon leur durée de vie, garantie par le fournisseur. Un système de nettoyage automatique des lampes est intégré dans les réacteurs UV. Aucun encrassement n'a été observé sur la durée d'exploitation (environ 3 ans).

3.2. Rendement hydraulique

Dans les filières étudiées, les pertes en eau sont principalement liées au lavage de l'ultrafiltration et de la filtration sur sable. Le rendement hydraulique de l'ultrafiltration pendant la période d'exploitation en 2014 est de 63,8 % pour un volume produit de 4 045 m³. Le rendement théorique attendu est de 80,6 % pour des cycles de 20 minutes et un débit de 3 m³/h. La différence s'explique par des problèmes techniques liés au vieillissement du pilote.

Le rendement hydraulique du filtre à sable pendant la période d'exploitation en 2015 est de 95,2 % pour un volume produit de 9 572 m³. Ce rendement correspond à une durée moyenne de cycle de 14,6 h, alors qu'une durée théorique de 24 h est attendue. Cet écart est lié à plusieurs facteurs :

- pilotage manuel du filtre à sable (pas d'acquiescement des défauts à distance et absence d'astreintes) ;

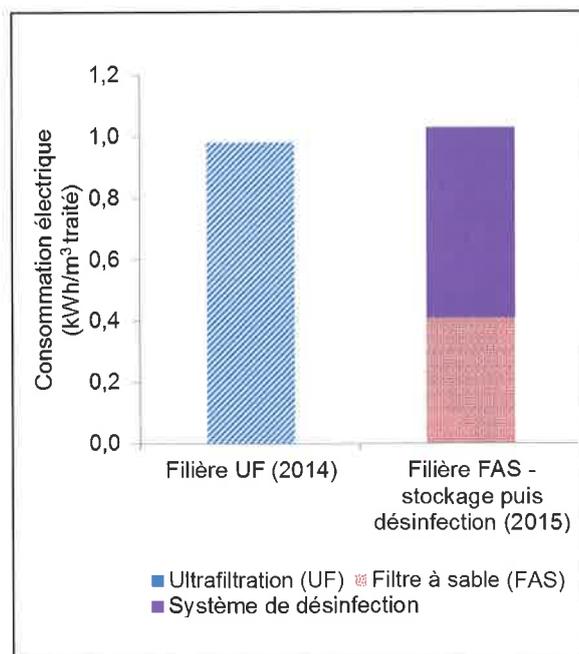


Figure 12. Consommation électrique par mètre cube d'eau produit (calculée par rapport à la consommation des différents équipements) pour les deux filières étudiées

- pics de MES dans l'eau brute entraînant des lavages plus fréquents (dépassement du seuil d'alerte de 0,3 bar).

3.3. Consommation électrique des équipements

Globalement, les deux filières étudiées présentent une consommation électrique équivalente autour de 1 kWh par mètre cube produit (figure 12). L'ultrafiltration consomme plus d'énergie que le filtre à sable, mais permet d'atteindre un niveau de qualité élevé en une seule étape. Pour ce qui concerne la désinfection UV, il faut noter que le réacteur en ligne exploité fonctionne sur une courte période avec une puissance importante (900 W).

Conclusion

Le choix d'une filière de réutilisation des eaux usées traitées ne peut être réalisé uniquement sur des critères économiques. L'usage doit être clairement identifié, car il détermine le niveau de qualité requis. Deux filières ont été étudiées à l'échelle pilote dans le cadre du projet Nowmma : filtration sur sable + désinfection UV et ultrafiltration. Ces filières s'inscrivent dans le contexte du respect du niveau de qualité A selon l'arrêté du 2 août 2010 modifié le 25 juin 2014. Ce niveau de qualité est équivalent à ceux définis par les réglementations des pays du bassin méditerranéen pour des usages urbains (restreints ou non) et/ou pour l'arrosage de cultures (transformées ou non). Le suivi de ces filières sur plusieurs mois permet un retour d'expérience intéressant sur les performances mais aussi sur l'exploitation de ce type de procédés.

Globalement, les deux filières étudiées permettent d'atteindre le niveau de qualité A, même dans le cas d'une casse de quelques fibres dans un module d'ultrafiltration. Une dégradation ponctuelle de la qualité de l'effluent secondaire (augmentation de la teneur en matières en suspension ou de la teneur en fer, par exemple) peut entraîner un colmatage plus rapide des membranes ou un encrassement des lampes UV et donc une maintenance plus importante. Le filtre à sable absorbe particulièrement bien ces variations de qualité et permet de garantir l'efficacité de la désinfection UV. La configuration avec du

sable grossier et sans injection de coagulant est suffisante pour l'effluent secondaire étudié. Dans le cas d'un effluent secondaire plus chargé, l'utilisation d'un sable plus fin et/ou l'injection de coagulant (de façon ponctuelle ou continue) pourraient être envisagées. Ce type de filière « robuste » semble donc approprié au contexte du bassin méditerranéen, en ayant bien identifié les points de contrôle critiques pour le suivi du bon fonctionnement. Par exemple, un problème sur le système de désinfection UV doit entraîner un arrêt immédiat de l'installation.

Enfin, les contraintes de la demande et du stockage sont à prendre en compte. Dans le cas de l'irrigation agricole, le volume d'eau nécessaire peut être utilisé de façon continue pendant la journée ou de façon

ponctuelle, le plus souvent en soirée. Ainsi les besoins des usagers déterminent le dimensionnement des installations de traitement tertiaires et de stockage.

Remerciements

L'ensemble des partenaires du projet Nowmma (Saur, BRL Ingénierie, BIO-UV, Perax, ApoH-Technologies, Irstea, École des mines d'Alès, LISBP/INSA Toulouse) remercient le ministère de l'Industrie (appel à projet Éco-Industries 2011) pour son soutien financier. Les auteurs souhaitent également remercier l'Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT) pour le financement Cifre.

Bibliographie

AFD (2012) : *La réutilisation des eaux usées traitées – lutter contre le stress hydrique et préserver l'environnement*. Agence française de développement.

ANSES (2012) : « Réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voiries : avis de l'Anses, rapport d'expertise collective ». Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail, saisine n° 2009-SA-0329.

BRISSAUD F. (2008) : « Low technology treatment systems for water reuse in small municipalities ». *Sustainable Water Management* ; 1 : 3-8.

CONDOM N., LEFEBVRE M., VANDOME L. (2012) : *La réutilisation des eaux usées traitées en Méditerranée : retours d'expériences et aide à l'élaboration de projets*. Plan Bleu, Valbonne. [Les Cahiers du Plan Bleu 11].

DE KONING J., MISKA V., RAVAZINI A. (2006) : « Water treatment options in reuse systems ». AQUAREC European project, Deliverable D17.

DGS – Direction générale de la santé (2016) : « Instruction interministérielle n° DGS/EA4/DEB/DGPE/2016/135 du 26 avril 2016 relative à la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts ».

EL HAÏTE H. (2010) : *Traitement des eaux usées par les réservoirs opérationnels et réutilisation pour l'irrigation* [thèse]. École nationale supérieure des mines, Saint-Étienne.

GRESLE A., LAZAROVA V., SUTY H. (2007) : « Intérêts techniques et économiques du traitement membranaire en vue du recyclage ». *Techniques Sciences Méthodes* ; 12 : 111-36.

ISO (2015) : « Lignes directrices pour l'utilisation des eaux usées traitées en irrigation ». International Standard Organisation ; ISO 16075.

JIMÉNEZ-CISNEROS B. (2014) : « Water reuse and recycling ». In : Satinder B., ed. *Comprehensive water quality and purification*. Amsterdam : Elsevier. p. 296-323.

JORF (2014) : « Arrêté du 25 juin 2014 modifiant l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts ». *Journal officiel de la République française* ; 153 (4 juillet 2014) : 11059-69.

LINDEN K.G., ROSENFELDT E.J. (2011) : « Ultraviolet light processes ». In : American Water Works Association, ed. *Water quality & treatment: a handbook on drinking water*. New York : McGraw Hill. p. 18.1-18.45.

OMS (2006) : *Lignes directrices pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères*.

PNUE – Programme des Nations unies pour l'environnement (2008) : *Vital water graphics – An overview of the state of the world's fresh and marine waters*, 2nd édition.

SANZ L.A., GAWLIK B.M. (2014) : « Water reuse in Europe: Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation ». European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.

Résumé

E. CARRÉ, J. PÉROT, V. JAUZEIN, L. LIN, M. LOPEZ-FERBER

Évaluation technique de filières tertiaires pour la réutilisation des eaux usées traitées

La région du bassin méditerranéen est particulièrement concernée par la problématique du stress hydrique. Dans les zones touristiques, la pression sur la ressource en eau peut induire une concurrence entre les usages pour l'eau potable, les usages récréatifs et les usages agricoles. Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) peut constituer une ressource en eau alternative, en répondant à un objectif quantitatif (protection des ressources en eau) et à un objectif qualitatif (protection du milieu récepteur). Les filières de traitement tertiaire étudiées dans le cadre de cette étude prennent en compte les contraintes technologiques, économiques et de maîtrise du risque sanitaire liées à une utilisation en irrigation dans le cadre réglementaire de l'arrêté français du 2 août 2010 modifié le 25 juin 2014. Deux types de filières pilotes sont mis en œuvre à l'échelle

industrielle en aval d'une station d'épuration de type boues activées (24 000 équivalent-habitant) : « ultrafiltration – stockage » et « filtration sur sable – stockage puis désinfection UV ». Cet article vise à présenter une évaluation technique de ces filières en prenant en compte trois aspects : les performances épuratoires et la constance de la qualité d'eau obtenue, la facilité d'exploitation, et l'adéquation avec les usages visés. Les filières étudiées permettent d'atteindre le niveau de qualité le plus élevé prévu par la réglementation française. Une dégradation ponctuelle de la qualité de l'effluent secondaire (augmentation de la teneur en matières en suspension ou de la teneur en fer, par exemple) peut entraîner un colmatage plus rapide des membranes d'ultrafiltration ou un encrassement des lampes UV et donc à une maintenance plus importante.

Abstract

E. CARRÉ, J. PÉROT, V. JAUZEIN, L. LIN, M. LOPEZ-FERBER

Technical evaluation of tertiary treatment processes for wastewater reuse

Water stress is a major issue in the Mediterranean region. In touristic areas, drinking water uses may compete with recreational or agricultural uses due to the overexploitation of water resources. In this context, treated wastewater reuse is a relevant alternative by addressing quantitative (protection of water resources) and qualitative (protection of the environment) issues. The tertiary treatment chains studied during this project take into account technical, economical and health risk management aspects related to the use for irrigation purposes as defined by the French decree of August 2, 2010 amended in June 25, 2014. Two treatment chains are

implemented on industrial pilot scale downstream a wastewater treatment plant (24,000 population equivalents): "ultrafiltration – storage" and "sand filtration – storage then UV disinfection". This article aims to provide technical assessment of these treatment processes, taking into account three aspects: effluent quality, O&M needs, and consistency with intended uses. All the treatment chains studied allow to achieve the highest quality standard defined by French regulations. However, some point deviations to this quality may result in rapid clogging of the ultrafiltration membranes or in UV lamp fouling, and thus the need for higher maintenance.



Le guide est commercialisé au tarif de 17 euros HT et à commander sur astee.org.

Ce guide est destiné aux organismes pratiquant les contrôles préalables à la réception des réseaux neufs d'assainissement. Il définit les conditions d'application pratiques des documents normatifs et réglementaires qui régissent les contrôles de réception des travaux neufs et précise les applications qui relèvent des bonnes pratiques.

