



HAL
open science

Réutilisation des eaux usées traitées : gestion des risques et performances des procédés de traitement au regard des nouvelles exigences réglementaires françaises

Sophie Guillaume-Ruty, A. Meunier, A. Azais, R Lombard Latune

► To cite this version:

Sophie Guillaume-Ruty, A. Meunier, A. Azais, R Lombard Latune. Réutilisation des eaux usées traitées : gestion des risques et performances des procédés de traitement au regard des nouvelles exigences réglementaires françaises. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2024, 10, pp.81-98. hal-04751249

HAL Id: hal-04751249

<https://hal.inrae.fr/hal-04751249v1>

Submitted on 24 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Réutilisation des eaux usées traitées : gestion des risques et performances des procédés de traitement au regard des nouvelles exigences réglementaires françaises

Treated wastewater reuse: risks management and treatment processes removal efficiency regarding nex French regulatory requirements

■ S. GUILLAUME-RUTY¹, A. MEUNIER¹, A. AZAIS¹, R. LOMBARD LATUNE^{1*}

¹ Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) – Unité de recherche Reversaal – Réduire, réutiliser, valoriser les ressources des eaux résiduaires – Centre de Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes

Mots-clés :

Approche multibarrière
Désinfection
Gestion intégrée
Indicateur microbiologique
Réutilisation des eaux usées

RÉSUMÉ

Le Plan eau annoncé en mars 2023 affiche des ambitions fortes pour la réutilisation des eaux usées traitées (REUT). La nécessaire refonte réglementaire du cadre national de la REUT s'est appuyée sur le Règlement européen de 2020. Pour les usages agricoles, par rapport aux dispositions préexistantes, l'arrêté de décembre 2023 est venu fortement renforcer les exigences en matière de qualité d'eau et de suivi. Il propose cependant en parallèle la possibilité de mobiliser des eaux de qualité moindre si d'autres mesures de protection complémentaires sont mises en place. Ce qui correspond à la mise en place d'une gestion intégrée des risques, ou approche multibarrière, proposée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Quelle que soit l'approche retenue, le traitement des eaux usées joue un rôle central dans le contrôle de l'exposition des populations de micro-organismes. Une large revue de la littérature permet de présenter pour les quatre familles de micro-organismes (bactéries, virus, protozoaires et helminthes) les performances atteintes par les principaux procédés de traitement des eaux usées domestiques. À partir de ces éléments, les options permises par chacune des approches proposées par le récent arrêté sont discutées. Un nombre limité de technologies de traitement permet d'atteindre les seuils de qualité demandés pour la classe A. L'ajout de barrières complémentaires au traitement permet d'élargir les possibilités techniques.

Keywords:

Multi-barrier approach
Disinfection
Integrated risk management
Microbiological indicator
Regulation

ABSTRACT

The Water Plan announced in March 2023 has strong ambitions for treated wastewater reuse. The needed regulatory overhaul of the national water reuse framework has been done, based on the 2020 European Regulation. For agricultural uses, compared to pre-existing measures, the decree of December 2023 significantly strengthened requirements in terms of water quality and monitoring. However, it also gives the possibility of using water of lower quality if additional protection measures are put in place. This corresponds to integrated risk management, or multi-barrier approach, as proposed by the WHO. Whichever approach is adopted, wastewater treatment plays a central role in controlling the exposure of populations to micro-organisms. A wide-ranging review of the literature on removal efficiency achieved by the main domestic wastewater treatment processes for the 4 families of micro-organisms (bacteria, viruses, protozoa and helminths) is presented. On the basis of these elements, the options offered by each of the approaches proposed by the recent decree are discussed. A limited number of treatment technologies could achieve quality thresholds required for class A. Adding additional barriers to the treatment expands the technical possibilities.

Introduction

Les tensions quantitatives et qualitatives sur l'eau amènent à repenser les interactions entre le petit cycle, associé aux usages anthropiques, et le grand cycle de l'eau. À ce titre, l'application du concept d'économie circulaire au champ de l'eau amène à considérer la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) comme étant une solution possible pour atténuer la pression sur le milieu naturel et accompagner l'adaptation vers une société plus économe de sa ressource en eau. Même si

la REUT est pratiquée en France et de par le monde depuis plus de 60 ans, parfois à des échelles massives (88 % en Israël), y compris pour des usages sensibles comme la production d'eau potable (Namibie, Singapour, États-Unis), elle est peu développée en France (0,5 % en 2017, Cerema, 2020). Pour répondre aux attentes qu'elle suscite, le gouvernement a impulsé une dynamique forte à travers le Plan Eau et l'objectif de développer 1 000 projets de REUT d'ici 2028 afin d'atteindre un taux de REUT de 10 % en 2030. Un an plus tard, les premiers effets pourraient commencer à se faire sentir renforcés probablement par la prise de

* Auteur correspondant – Courriel : remi.lombard-latune@inrae.fr

conscience produite par la sécheresse de l'été 2022. En effet, s'il y avait seulement 4 projets de REUT en fonctionnement de plus en 2022 par rapport à 2017 [EPNAC, 2023], il y en a eu 12 de plus entre mars 2023 et mars 2024 [MTEC, 2024].

L'appel au développement de la pratique exacerbe les questionnements relatifs aux risques sanitaires associés à REUT. D'un point de vue sanitaire, les eaux usées présentent des risques associés aux polluants qu'elles contiennent. Pour y répondre, le cadre réglementaire évolue en renforçant certaines exigences : les concentrations en indicateurs microbiologiques ont ainsi été divisées par 100 entre les arrêtés français de 2014 et celles de l'arrêté de 2023 pour la REUT agricole, même si d'autres risques sont laissés de côté (micropolluants, antibiorésistance...). En parallèle, le nouveau cadre réglementaire introduit également la possibilité de déroger à ces seuils de qualité poussés si est mise en place une gestion intégrée des risques (ou approche multi-barrière) telle qu'elle est présentée dans les directives de l'OMS pour la REUT agricole (2006).

Pour accompagner le développement de la REUT en France, que les projets s'appuient sur une gestion intégrée du risque ou sur une gestion centrée sur le traitement, il est nécessaire de connaître les performances des procédés de traitement des eaux usées vis-à-vis des différents types de micro-organismes. Dans cette optique, une large revue de la littérature a été réalisée. Avant de présenter une synthèse des informations collectées, nous reviendrons sur les risques microbiologiques et les cadres en place pour les gérer dans le contexte de la REUT.

1. Risques microbiologiques et cadres réglementaires

1.1. Germes pathogènes

La réutilisation des eaux usées traitées peut possiblement présenter des risques sanitaires pour les personnes exposées (consommateurs, riverains/passants, personnels agricoles...). Les eaux usées brutes contiennent des micro-organismes que l'on peut classer en quatre familles : virus, bactéries, protozoaires et helminthes (tableau I). Les helminthes ne sont pas à proprement parler des micro-organismes puisque ce sont des organismes pluricellulaires, des vers, dont la taille dépasse le millimètre. En revanche, ce sont leurs œufs, invisibles à l'œil nu, qui font l'objet d'une surveillance en tant qu'indicateur microbiologique.

Chacun de ces types de micro-organismes rassemble des centaines, voire des milliers d'espèces. Parmi elles, certaines espèces (ou certaines souches d'une espèce) sont pathogènes pour l'homme ou pour le bétail (voir tableau I). Du point de vue sanitaire, il est important de prendre en compte la notion de dose. La dose minimale infectieuse (DMI) correspond à la quantité d'unités infectieuses qui doit être absorbée pour que la maladie se développe et que des symptômes se manifestent chez l'individu exposé. Les DMI sont très variables selon les différents types de micro-organismes pathogènes (tableau I). Elle est définie à partir des populations les plus fragiles. En effet, la réponse de l'hôte dépend de certaines caractéristiques, dont entre autres : l'âge, le sexe, l'immunité (innée ou acquise), mais aussi du

Type de germe	Virus	Bactéries	Protozoaires (kystes)	Helminthes (œufs)
Taille (µm)	0,01 – 0,35	0,2 – 10	3 – 30 (2 – 15)	> 1 000 (40)
Concentrations dans les eaux usées brutes (unité formant colonie (UFC)/100mL)	100 – 10 ⁵	10 ³ – 10 ⁹	10 - 10 ⁵	100 - 10 ⁴
Doses minimales infectieuses (nombre d'unités)	10 à 10 ²	10 ² à 10 ⁷	10 à 10 ²	1 à 10
Organismes Indicateurs	Coliphages somatiques, Coliphages ARN-F-spécifiques	<i>Escherichia coli</i> , Coliformes totaux, Entérocoques fécaux, <i>Legionella</i> spp.	Spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrice (par exemple <i>Clostridium perfringens</i>)	Œufs d'ascaris
Exemples de maladies	Diarrhée, gastro-entérite, hépatite	Choléra, diarrhée hémorragique aiguë, fièvre typhoïde	Diarrhée chronique, diarrhée aiguë, cryptosporidiose	Ascariose, Schistosomiase, Ténia

Tableau I. Comparaison des caractéristiques des familles de micro-organismes et présentation des principaux indicateurs réglementaires. Source : [FEACHEM et al., 1983 ; GODFREE, 2003 ; BEAUMONT, 2004] ; arrêté français du 18 décembre 2023

niveau de fatigue, la présence d'autres infections, etc. Ainsi les concentrations en pathogènes ne permettent pas à elles seules d'évaluer le risque auquel sont exposées les populations, la notion de dose est fondamentale à prendre en compte. Par exemple, les helminthes sont présents à des concentrations plus faibles que les autres types de pathogènes (quelques centaines d'œufs par litre), en revanche leur DMI est également plus faible (comprise entre 1 et 10 unités ingérées seulement). Cela signifie qu'un seul helminthe peut suffire à contaminer une personne. Les bactéries sont quant à elles à des concentrations bien plus importantes (10^6 à 10^9 dans 100 mL), mais la dose minimale nécessaire pour infecter un individu est plus élevée aussi et oscille entre 100 et 10^7 unités en fonction de la souche considérée.

Par ailleurs, la présence des micro-organismes pathogènes dans les eaux usées est extrêmement variable, dans le temps comme dans l'espace. Du fait du nombre et de la variété importante des germes pathogènes, leur mesure directe afin de contrôler leur présence (comme cela a été fait dans de nombreux pays pour le SARS-Cov-2) est impossible. Ainsi, des organismes indicateurs de contamination sont utilisés. Sans être forcément eux-mêmes pathogènes pour l'homme, leur présence renseigne sur la possibilité de présence d'organismes pathogènes partageant des caractéristiques communes (taille, structure). Si leur nombre diminue par le fait d'un traitement, par exemple, cela signifie que les organismes pathogènes qu'ils représentent voient également leur concentration se réduire. Le suivi porte habituellement sur quelques indicateurs capables de donner une idée du niveau global d'élimination des germes au cours du traitement. Ceux-ci sont choisis sur les caractéristiques suivantes [AFSSA, 2008] : origine fécale, présence en quantité supérieure à celle des organismes ciblés, résistance aux stress environnementaux et aux traitements au moins égales à celle des organismes cibles, suivi simple et peu coûteux, pathogénicité limitée.

L'indicateur le plus courant est *Escherichia coli*, une bactérie entérique (adaptée au milieu intestinal humain) représentant la majorité des coliformes fécaux, mais qui s'avère peu résistante aux traitements par oxydation [PIERZO, 2000]. Si elle est un bon marqueur de contamination fécale dans l'environnement, elle n'est pas suffisante pour caractériser l'efficacité des traitements pour tous les types de micro-organismes. Pour cette raison, d'autres indicateurs sont utilisés :

– pour les virus, ce sont les coliphages qui sont utilisés (bactériophages somatiques ou à défaut bactériophages ARN-F spécifiques), qui sont des virus qui s'attaquent aux bactéries ;

– pour les protozoaires, l'enjeu sanitaire n'est pas lié aux organismes en eux-mêmes qui sont bien éliminés par les traitements, mais à leurs formes de résistances, les kystes. Plutôt que de suivre les kystes de protozoaires (présents en quantités très variables, en fonction de la prévalence de la maladie dans la population), l'indicateur choisi est les spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices (dont *Clostridium perfringens* est une variété). Ces spores ont des propriétés physiques de résistance à l'oxydation et aux rayonnements comparables aux kystes. Elles sont en revanche plus petites et de ce fait moins facilement éliminées par filtration ;

– pour les helminthes, ce sont généralement les œufs d'*Ascaris*, le type d'helminthes le plus fréquent, qui sont suivis.

En conclusion, il n'existe pas d'indicateur unique permettant de suivre l'ensemble des micro-organismes pathogènes. *Escherichia coli* (bactérie) doit être complété par d'autres indicateurs. La liste des indicateurs n'est pas arrêtée, elle évolue dans le temps et spatialement (pays). Les Anglo-Saxons utilisent, par exemple, les norovirus (virus responsable des épidémies de gastro-entérites aiguës chez l'homme) comme indicateur viral. Pour protéger les populations tout en accompagnant le développement des pratiques, l'État a mis en place une réglementation. Comment ces différents éléments : types de micro-organismes, doses minimales infectieuses, types d'indicateurs sont-ils mobilisés pour construire la réglementation française ?

1.2. Un cadre réglementaire national en évolution

Le premier arrêté français encadrant la REUT agricole date d'août 2010. Il a été revu une première fois en juin 2014 pour sortir l'irrigation par aspersion du champ de l'expérimentation et l'intégrer pleinement. Le règlement européen sur la REUT agricole publié en mai 2020 et applicable en juin 2023 est venu imposer de nouvelles prescriptions. Un nouvel arrêté français a été pris en application en décembre 2023 et vient renforcer à nouveau le cadre réglementaire (nécessité de suivre en routine les concentrations en virus et protozoaires).

La comparaison des arrêtés français de 2014 et 2023 (tableau II) montre que les cadres réglementaires construisent la gestion des risques associés à la REUT en associant à des catégories de cultures (A, B, C et D) des classes d'eaux définies par des concentrations en indicateurs. Ces indicateurs correspondent pour partie à des paramètres physico-chimiques « classiques » de l'assainissement (matières en suspension (MES), demande biologique ou chimique en oxygènes (DBO₅,

Paramètres	Niveau de qualité sanitaire des EUT								Irrigation hors REUT	Baignade
	A ₂₀₂₃	B ₂₀₂₃	A ₂₀₁₄	C ₂₀₂₃	D ₂₀₂₃	B ₂₀₁₄	C ₂₀₁₄	D ₂₀₁₄		
MES (mg/L)	≤ 10*	Min. rég. ¹	< 15*	Min. rég. ¹	-	-				
DBO ₅ (mg/L)	≤ 10*	Min. rég. ¹	-	Min. rég. ¹	Min. rég. ¹	-	-	-	-	-
DCO (mg/L)	-	-	< 60*	-	-	Min. rég. ¹	Min. rég. ¹	Min. rég. ¹	-	-
<i>Escherichia coli</i> en UFC/100 mL, (réduction log)	≤ 10* (≥ 5**)	≤ 100* (≥ 3**2)	≤ 250*	≤ 1 000*** (≥ 2**)	≤ 10 000*** (≥ 2**)	≤ 10 000***	≤ 100 000****	≤ 100 000****	-	≤ 900****3
Entérocoques fécaux (réduction log)	-	-	≥ 4**	-	-	≥ 3**	≥ 2**	≥ 2**	-	-
Phages ARN F-spécifiques en UFC/100mL (réduction log)	≤ 10* (≥ 6**)	≤ 100*2 (≥ 3**2)	≥ 4**	≤ 1 000***2 (≥ 2**)	≤ 10 000****2 (≥ 2**)	≥ 3**	≥ 2**	≥ 2**	-	-
<i>Clostridium perfringens</i> ...	≤ 10* (≥ 4**)	≤ 100*2 (≥ 3**2)	-	≤ 1 000***2 (≥ 2**)	≤ 10 000****2 (≥ 2**)	-	-	-	-	-
... ou Spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices (réduction log)	≥ 5**	≥ 3**2	≥ 4**	≥ 2**	≥ 2**	≥ 3**	≥ 2**	≥ 2**	-	-
Turbidité (NTU), suivi continu	≤ 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Legionella</i> spp. (UFC/100mL) si aérosols	≤ 1 000***	≤ 1 000***	-	≤ 1 000***	≤ 1 000***	-	-	-	-	-
Œufs d'helminthes (Œufs/L) si pâturages ou fourrages frais	≤ 1***	≤ 1***	-	≤ 1***	≤ 1***	-	-	-	-	-

Tableau II. Comparaison des seuils de qualité définis par les arrêtés français de 2014 et 2023

Fréquence des suivis : * : 1/7j ; ** : 1/2 ans ; *** : 1/15j ; **** : 1/mois.

1 : Les seuils de qualité et les fréquences de suivi sont ceux définis par la réglementation sur l'assainissement collectif (à l'heure actuelle par l'arrêté du 21/07/2015).

2 : Suivi à réaliser dans le cas de la mise en place de barrières complémentaires au traitement et que la culture correspond à une classe A.

3 : Directive européenne 2006/7/CE, le seuil est porté à ≤ 1 000 durant les JO (réglementation World Aquatics).

MES : matières en suspension; DBO₅ : demande biochimique à 5 jours, UFC : unité formant colonie; UFP : unité formant plage.

DCO), ou turbidité) qui ne présagent pas des risques associés à la REUT. À l'exception de la classe A pour laquelle des niveaux poussés sont attendus (et sont nécessaires pour atteindre les seuils microbiologiques associés), ce sont les seuils en sortie de stations d'épuration (STEP) conventionnelles qui sont demandés. Les classes de qualité pour la REUT sont principalement définies par les indicateurs microbiologiques. On retrouve les indicateurs bactériens *Escherichia coli* et entérocoques fécaux, même si ces derniers sont abandonnés en 2023. Pour les virus, ce sont les coliphages et pour les protozoaires, les spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices qui sont retenus, même si là encore les indicateurs évoluent entre les textes (ajout de *Clostridium perfringens* et des coliphages somatiques en 2023). Deux autres indicateurs font leur apparition en 2023 : *Legionella* spp. et les œufs d'Helminthes, respectivement dans les cas où l'irrigation entraîne la formation d'aérosols ou dans le cas de la production d'aliments frais pour le bétail.

Au-delà de quelques indicateurs, ce sont les concentrations seuils qui évoluent le plus entre les deux arrêtés : sur *E. coli*, elles sont divisées par 25 pour la classe A et par 100 pour les classes B, C et D. Cet écart est important et nécessite un traitement plus poussé ou une étape de traitement supplémentaire. Au-delà de la question qui ne sera pas traitée ici des impacts, économiques et environnementaux que suppose un traitement plus poussé des eaux usées avant leur réutilisation, il est intéressant de comparer les seuils de qualité imposés à la REUT d'une part aux concentrations auxquelles on retrouve les indicateurs dans les eaux usées brutes (tableau I) et, d'autre part, aux réglementations sur la baignade et l'irrigation agricole (tableau II). On observe ainsi que pour satisfaire à une classe A, l'infrastructure de traitement doit atteindre pour les virus une réduction de 6 log (diviser les concentrations par 1 million), alors que dans les eaux usées brutes les concentrations sont généralement au maximum de l'ordre de 5 log (100 000). Par ailleurs, la qualité d'une eau de baignade est définie à partir d'*Escherichia coli*, et le seuil retenu correspond à une qualité C pour la REUT. Enfin, si l'irrigation ne mobilise pas des eaux produites dans le cas de la REUT, il n'y a pas de contrôle de la qualité des eaux. Le feuilleton² du printemps 2024 sur la baignade dans la Seine lors des JO montre que la

qualité en *E. coli* des eaux de surface correspond difficilement à une classe C. En conséquence, les exigences imposées à la REUT mériteraient d'être mises en perspective avec ce qui est demandé pour d'autres usages comme la baignade, ou l'irrigation agricole à partir de masses d'eau conventionnelles. Par ailleurs, la question de l'impact sanitaire de ces dernières pratiques se pose, compte tenu de ce qui est exigé pour la REUT.

Ces modifications de l'arrêté de 2023 proviennent principalement du règlement européen à partir duquel il a été construit. Il faut noter que l'arrêté français vient ajouter au cadre européen un suivi beaucoup plus fréquent des qualités pour les virus et les protozoaires, pour toutes les classes d'eau dans le cas de cultures dont la partie consommée crue est en contact direct avec l'eau. Les valeurs de ces seuils supplémentaires sont les mêmes que ceux définis pour *E. coli*. Si ces ajouts semblent cohérents du point de vue microbiologique compte tenu des limites de *E. coli* (voir § 1.1), leurs apports opérationnels sont limités, mais se traduisent par des conséquences lourdes, en terme économique et également de gestion des risques, comme cela sera développé par la suite. Aux différentes classes d'eau est associé pour certains paramètres un suivi. Il existe deux types de suivis, un suivi en routine des concentrations (de fréquence hebdomadaire pour les classes A et B, ou bimensuelle pour C et D) et un suivi de performances d'abattement des procédés, à faire au démarrage de l'installation, puis tous les 2 ans. Les modifications apportées par l'arrêté de 2023 ont des conséquences importantes. Les fréquences sont augmentées pour les classes B et D, mais surtout, l'ensemble des paramètres microbiologiques fait l'objet du suivi en routine. Ces analyses sont chères, et les laboratoires prestataires ont parfois des limites de quantification supérieures aux seuils réglementaires. À titre d'exemple, à partir des devis des prestataires avec lesquels nous travaillons, sans faire d'étude économique poussée, une année de suivi d'un point de conformité en classe A passe d'environ 350 € dans le cadre du règlement européen à plus de 2500 € dans le cadre de l'arrêté de 2023. Au point de conformité qui correspond à la sortie du dernier procédé de traitement, s'ajoutent des points de conformité complémentaires en sortie de stockage ou du réseau de distribution. L'impact économique du suivi en routine n'est pas négligeable, en revanche son intérêt opérationnel questionne. Les résultats des analyses sont souvent rendus 7 à 15 jours après le prélèvement. Comment, dans ces conditions, piloter un traitement, réduire ou modifier des usages, tout en gérant les conséquences pour les acteurs économiques en aval ? Le règlement européen (RE) propose de se contenter,

² Plusieurs organismes (Ville de Paris, ou l'ONG Surfrider) suivent la qualité de l'eau de la Seine, les résultats sont consultables sur leurs sites : <https://www.paris.fr/pages/meteo-de-la-seine-quelle-est-la-qualite-de-l-eau-du-fleuve-27467>, et <https://www.surfrider.fr/nos-missions/qualite-eau-sante-usagers/qualite-eau-seine/>

en routine (c'est-à-dire pour détecter un dysfonctionnement) du suivi d'*E. coli*, moins cher et dont les résultats peuvent être fournis en quelques jours, et suivre les autres paramètres régulièrement, mais à des pas de temps plus espacés, ce qui semble être un bon compromis.

Du point de vue des catégories de cultures auxquelles sont associées ces classes de qualité, la comparaison des arrêtés de 2014 (tableau III) et 2023 (tableau IV) montre une apparente simplification. En effet, l'arrêté de 2014 détaillait beaucoup de cultures et associait pour chacune

Type d'usage	Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées			
	A	B	C	D
Cultures maraîchères, fruitières et légumières non transformées par un traitement thermique industriel adapté (excepté cressiculture (1))	+	-	-	-
Cultures maraîchères, fruitières, légumières transformées par un traitement thermique industriel adapté	+	+	-	-
Pâturage (2)	+	+ (3)	-	-
Espaces verts ouverts au public (4)	+ (5)	-	-	-
Fleurs vendues coupées	+	+ (6)	-	-
Pépinières et arbustes et autres cultures florales	+	+	+ (6)	-
Fourrage frais	+	+ (3)	-	-
Autres cultures céréalières et fourragères	+	+	+ (6)	-
Arboriculture fruitière	+	+ (7)	+ (8)	-
Taillis à courte rotation ou à très courte rotation, avec accès contrôlé du public	+	+	+ (6)	+ (6)
Forêt, hors taillis à courte rotation avec accès contrôlé du public	-	-	-	-

Tableau III. Contraintes d'usages et catégories de culture. Arrêté du 25 juin 2014, annexe 3, alinéa 1

+ autorisée, - interdite.

(1) La réutilisation d'eaux usées traitées est interdite pour la cressiculture.

(2) En cas d'aspersion, les animaux ne doivent pas être au champ au moment de l'opération et les abreuvoirs, au cas où ils seraient arrosés, doivent être rincés avant utilisation.

(3) Sous réserve du respect d'un délai après irrigation de 10 jours en l'absence d'abattoir relié à la station de traitement des eaux usées et de 21 jours dans le cas contraire.

(4) On entend par espace vert, notamment : les aires d'autoroutes, cimetières, golfs, hippodromes, parcs, jardins publics, parties communes de lotissements, ronds-points et autres terre-pleins, squares, stades, etc.

(5) Irrigation en dehors des heures d'ouverture au public, ou fermeture aux usagers pendant l'irrigation et deux heures suivant l'irrigation dans le cas d'espaces verts fermés ; irrigation pendant les heures de plus faible fréquentation et interdiction d'accès aux passants pendant l'irrigation et deux heures suivant l'irrigation dans le cas d'espaces verts ouverts de façon permanente.

(6) Uniquement par irrigation localisée, telle que définie à l'article 2.

(7) Interdite pendant la période allant de la floraison à la cueillette pour les fruits non transformés, sauf en cas d'irrigation au goutte-à-goutte.

(8) Uniquement par goutte-à-goutte.

Type d'usage	Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées			
	A	B	C	D
Toutes les cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est en contact direct avec l'eau usée traitée et les plantes racines consommées crues (1)	+	*	*	-
Cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est cultivée en surface et n'est pas en contact direct avec l'eau usée traitée, cultures vivrières transformées et cultures non vivrières y compris servant à l'alimentation des animaux producteurs de lait ou de viande (hors fourrage frais, pâturage, cultures industrielles, cultures énergétiques et cultures semencières)	+	+ (2)	*	-
Fourrage frais et pâturage	+	+	*	-
Cultures industrielles, cultures énergétiques et cultures semencières	+	+	+	+

+ autorisée, - interdite, * possible en mettant en place un système de barrières appropriées tel que défini en section 2.

(1) La réutilisation d'eaux usées traitées est interdite pour la cressiculture.

(2) L'irrigation pour l'arboriculture fruitière est interdite pendant la période allant de la floraison à la cueillette pour les fruits non transformés, sauf en cas d'irrigation au goutte-à-goutte.

Tableau IV. Usages possibles suivant le niveau de qualité des eaux usées traitées. Arrêté du 18 décembre 2023, annexe 1, section 1

d'elles une/des classes d'eau et des contraintes d'utilisation. L'arrêté de 2023 ne définit que quatre types de cultures et y associe une ou plusieurs classes d'eau, dont certaines assorties de la contrainte de « mettre en place un système de barrières appropriées ». Ces contraintes d'usages ou système de barrières appropriées font référence à une gestion intégrée des risques, telle que définie par l'OMS en 2006. L'arrêté de 2014 intégrait de manières génériques différentes barrières, alors que le RE et l'arrêté de 2023 nécessitent de concevoir sur mesure pour chaque projet un système de barrières. Quelle est cette gestion intégrée des risques « par barrières » qui apparaît dans les récents textes réglementaires et qui, si elle est mise en place, pourrait permettre d'être en conformité avec le cadre réglementaire sans aller jusqu'à des niveaux de qualité très poussés ?

1.3. Approche multi-barrière

L'approche « multi-barrière » correspond au cadre proposé par l'OMS dans ses dernières directives sur la réutilisation des eaux usées en agriculture (2006). Le principe est de partir d'objectifs liés à la santé pour définir un niveau de protection sanitaire. L'objectif retenu est le même que pour l'eau potable, c'est-à-dire que la REUT ne doit pas présenter plus de risques que la consommation d'eau potable. Cet objectif est traduit en « dose tolérable ». Pour garantir la protection sanitaire de la population, des mesures de protections sont proposées qui permettent d'assurer qu'aucune personne ne soit exposée à des doses supérieures à cette dose tolérable. La figure 1 illustre cette approche et quelques catégories de mesures de protection mobilisables.

Ces mesures de protection, ou barrières à l'exposition, sont de deux natures correspondant aux deux composantes de la dose : la concentration et le volume. Certaines barrières comme le traitement permettent de

contrôler les concentrations en polluants dans les eaux et d'autres, les volumes auxquels les différentes populations sont exposées. Ces barrières et leurs effets ont été décrits dans différentes directives ([OMS, 2006] ; Australie [NRMMC-EPHC-AHMC, 2006] ; USA [USEPA, 2012]) et font l'objet d'une norme ISO (16075). L'arrêté français de décembre 2023 reprend, comme le RE, le cadre d'application proposé par la norme ISO. Il associe à chaque barrière un « nombre d'équivalent barrières » (tableau V), et à chaque type d'usage un nombre de barrières à mobiliser en fonction de la classe de qualité utilisée (tableau VI). Ce cadre avec les nombres d'équivalent barrières présente l'avantage d'opérationnaliser de manière simple l'approche multi-barrière. Mais il présente des inconvénients :

- il ne semble pas être construit sur des travaux scientifiques : les documents consultés n'ont pas permis d'identifier de travaux scientifiques qui proposent des points de barrières ni un nombre de barrières à associer aux différentes cultures. Le choix qui a été fait d'attribuer à chaque barrière (hors traitement) un nombre de points correspondant à la moitié des réductions d'exposition qu'il permet est très discutable ;
 - il centre le risque sur le consommateur au détriment des autres populations exposées ;
 - il invisibilise les notions de dose et de volumes d'exposition pourtant centrales dans la gestion du risque.
- Des travaux sont en cours pour proposer un autre cadre d'application de l'approche multi-barrière [THOMAS et al., 2024].

Si l'arrêté de 2023 ouvre la porte à une construction sur mesure de la gestion des risques à travers la possibilité d'avoir recours à une combinaison de barrières pour gérer l'exposition des populations aux eaux usées traitées, force est de constater qu'il reste très dépendant des barrières permettant une réduction des concentra-

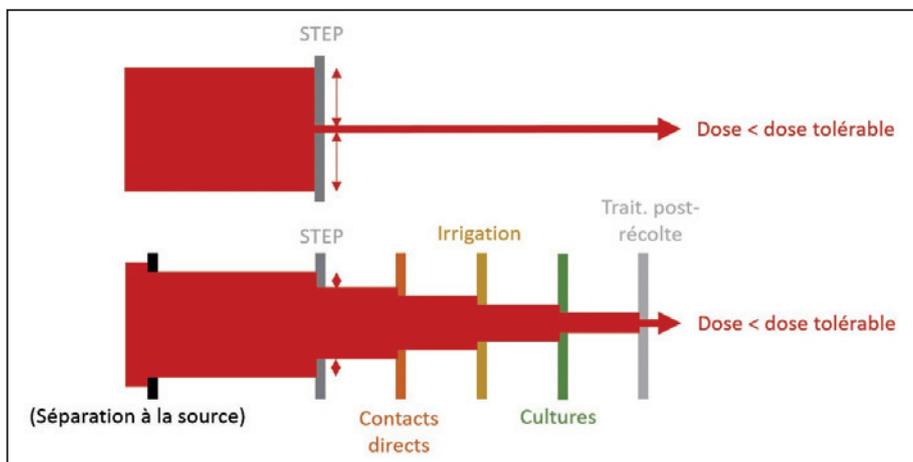


Figure 1. Principe de la gestion des risques dans la REUT agricole : gestion centralisée à la station d'épuration (STEP) par une approche « tout traitement » en haut et gestion intégrée par une approche « multi-barrière » en bas

Type de barrière	Application	Réduction des agents pathogènes (unités log)	Nombre d'équivalents barrières
Irrigation des cultures vivrières			
Irrigation localisée (sans stagnation de l'eau en surface et sans contact des parties comestibles avec les eaux usées traitées)	Irrigation de cultures basses (à au moins 25 cm au-dessus du sol)	2	1
	Irrigation de cultures hautes (à au moins 50 cm au-dessus du sol)	4	2
	Irrigation souterraine par goutte-à-goutte, lorsque l'eau ne remonte pas à la surface du sol par capillarité	6	3
Bâche résistante aux UV	Dans le cadre de l'irrigation par goutte-à-goutte, lorsque la bâche sépare les eaux d'irrigation des cultures irriguées	2 à 4	1
Inactivation naturelle des agents pathogènes	Inactivation naturelle favorisée par l'arrêt ou l'interruption de l'irrigation avant la récolte	0,5 à 2 par jour (selon les cultures et conditions météorologiques)	1 à 2
Lavage des produits avant leur vente aux consommateurs (1)	Lavage à l'eau potable	1	1
Désinfection des produits avant leur vente aux consommateurs (1)	Lavage avec une solution légèrement désinfectante et rinçage à l'eau potable	2	1
Pelage des produits avant leur vente aux consommateurs (1)	Pelage des fruits et légumes	2	1
Irrigation de fourrage frais et pâturage			
Contrôle de l'accès	Restriction de l'accès au champ irrigué pendant 10 jours en l'absence d'abattoir relié à la station de traitement des eaux usées et de 21 jours dans le cas contraire	2 à 4	2
Séchage au soleil des plantes	Les plantes fourragères et autres cultures sont séchées au soleil et récoltées avant consommation	2 à 4	2

Tableau V. Description des barrières et du nombre d'équivalent barrières associé. Arrêté du 18 décembre 2023, annexe 1, section 2

(1) La mise en œuvre de ce type de barrière devra spécifiquement être attribuée à l'utilisateur ou à tout autre établissement partie prenante aux barrières qui devront en produire les justificatifs avec la traçabilité adéquate au long de la chaîne alimentaire. La liste des barrières proposées n'est pas exhaustive.

Type de culture	Classe de qualité et nombre minimum de barrières			
	A	B	C	D
Toutes les cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est en contact direct avec l'eau usée traitée et les plantes racines consommées crues	0	1	3	Interdit
Cultures vivrières consommées crues dont la partie comestible est cultivée en surface et n'est pas en contact direct avec l'eau, cultures vivrières transformées et cultures non vivrières y compris servant à l'alimentation des animaux producteurs de lait ou de viande (hors fourrage frais et pâturage cultures industrielles, cultures énergétiques et cultures semencières)	0	0	2	Interdit sauf si utilisation localisée : 3
Fourrage frais et pâturage	0	0	2	Interdit
Cultures industrielles, cultures énergétiques et cultures semencières	0	0	0	0

Tableau VI. Nombre de barrières en fonction des types d'usages et des classes de qualité des eaux. Arrêté du 18 décembre 2023, annexe 1, section 2

tions en micro-organismes dans les eaux usées. En effet, dans le cadre de cultures consommées crues dont la partie comestible est en contact direct avec l'eau, il est effectivement possible de mobiliser des eaux de classes B ou C (tableau VI), mais au prix de performances plus élevées sur les virus et protozoaires que pour les autres types de cultures (« 2 » du tableau II), et surtout de la mise en place d'un suivi hebdomadaire sur l'ensemble des paramètres microbiologiques.

Quelle que soit l'approche de gestion des risques retenue : centrée sur l'atteinte des valeurs seuils réglementaire, ou approche multi-barrière, la question des performances des différents procédés de traitements des eaux est centrale. Une étude bibliographique a été réalisée dans le but de synthétiser les performances des principaux procédés de traitement vis-à-vis des différents types de micro-organismes, dans la perspective de la REUT.

2. Performances des principaux procédés de traitement des eaux usées domestiques

2.1. Bibliométrie, collecte et tri des données

La recherche bibliographique a été menée prioritairement sur des travaux scientifiques qui ont servi de base aux réglementations nationales (France, États-Unis, Australie, UE...) et directives internationales (OMS, FAO...). En complément, afin d'actualiser les données d'abattement des germes pathogènes, une recherche bibliographique par mots-clés a été réalisée sur les

moteurs Science Direct et Google scholar. Les termes « water treatment », « wastewater treatment » ou « désinfection », ainsi que « pathogen removal », « pathogen » ou « micro-organism » ont été recherchés dans les titres, abstracts et mots-clés.

Plus de 150 documents ont été ainsi identifiés. Les abattements ont été collectés pour plus de la moitié d'entre eux : 12 livres/rapports/directives, 21 articles de type reviews, et 36 articles scientifiques. Le travail a été exhaustif sur les directives et les ouvrages de référence ainsi que les reviews. Les articles scientifiques régulièrement cités ont été étudiés comme les études les plus récentes.

La base de données brutes ainsi constituée rassemblait 1211 entrées. Une étape de tri a été effectuée pour éliminer les redondances (articles de références dont les valeurs sont reprises dans les reviews puis dans les directives), mais aussi les procédés de traitements pour lesquels il y avait soit peu de résultats ou d'études, ou qui ne sont que peu mobilisés pour le traitement des eaux usées domestiques (procédés d'oxydation avancés – hors ozonation - par exemple). La base finale comporte 627 entrées.

2.2. Résultats et discussion

2.2.1. Une grande variété de micro-organismes indicateurs

Comme expliqué précédemment (§ 1.1) il n'existe pas d'indicateur unique pour suivre la qualité microbiologique des eaux usées. On retrouve donc les quatre types de micro-organismes (figure 2), même s'ils ne sont pas suivis à la même fréquence : on constate que le

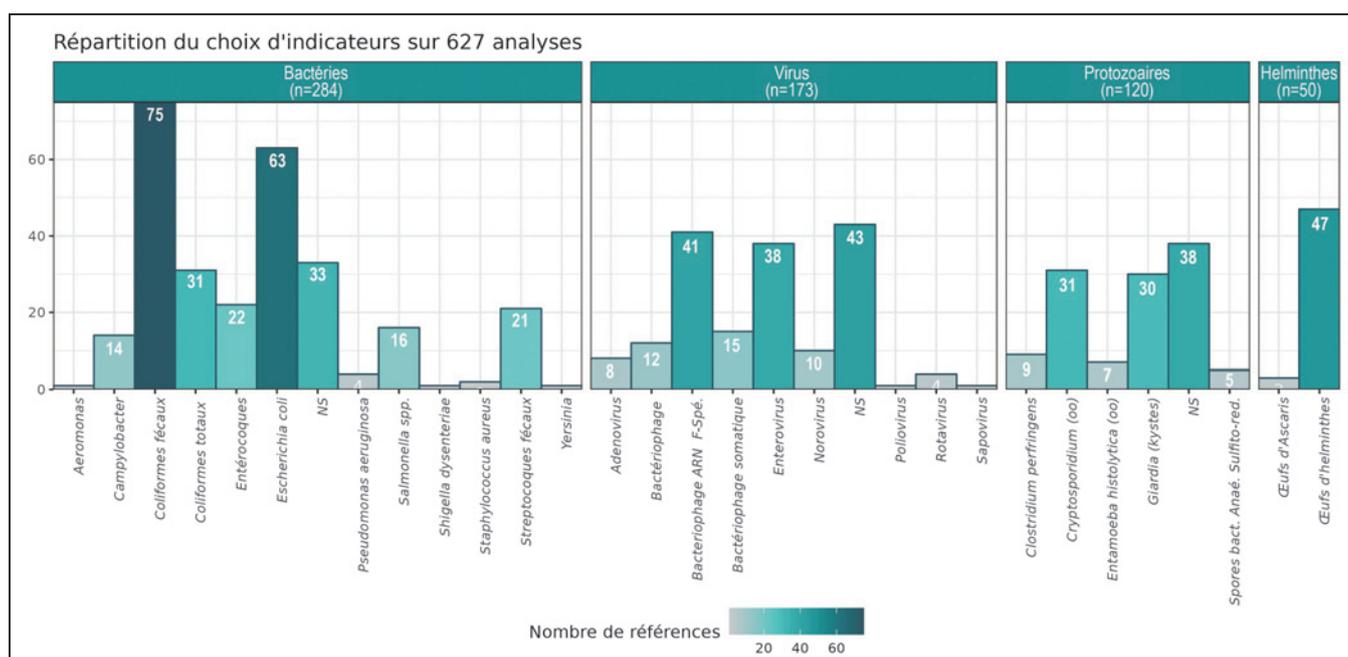


Figure 2. Fréquence d'occurrence des différents indicateurs microbiologique. NS : non spécifié

nombre de données est bien supérieur pour les bactéries que pour les helminthes (45 % des données contre moins de 8 %). Historiquement, les premières directives étaient centrées sur les indicateurs bactériens coliformes fécaux, totaux, puis *Escherichia coli*. Par la suite les indicateurs viraux ou pour les protozoaires ont été de plus en plus utilisés. Plusieurs raisons peuvent expliquer le faible suivi des Helminthes : le coût et la complexité de l'analyse basée sur l'identification des œufs, la prévalence des maladies associées (principalement dans les pays émergents), ou les voies de contamination (cutanées ou bétails). Enfin, l'importante variété d'indicateurs dans chaque type de micro-organismes s'explique à la fois par l'évolution des connaissances, techniques analytiques, et cadres réglementaires, mais aussi par des préférences ou des habitudes différentes entre les pays. Par exemple en Europe ce sont les bactériophages (virus ciblant les bactéries) qui sont utilisés comme indicateurs viraux, alors que les Anglo-Saxons suivent des virus pathogènes pour l'homme.

Comme exposé au point suivant, pour un procédé donné et un même type de micro-organismes, les performances diffèrent entre les indicateurs, qui ne sont évidemment pas tous repris dans chaque étude. Ce foisonnement d'indicateurs et leurs dynamiques temporelles individuelles (apparition, abandon) limitent bien évi-

demment la comparaison entre les études et rendent délicat l'exercice de la synthèse.

2.2.2. Limites de l'approche : illustration des résultats pour quelques procédés

À titre d'exemple des résultats obtenus, les figures 3 et 4 présentent les données collectées pour les procédés à boues activées et désinfection par UV. En complément du foisonnement d'indicateurs évoqué précédemment, il y a une multiplicité de conditions expérimentales qui diffèrent d'une étude à l'autre : conception (dose appliquée, charge nominale, temps de séjour, matériaux, etc.), type d'eaux usées (eaux usées domestiques, effluents synthétiques), méthode analytique (mise en culture, colorimétrie, qPCR...). Enfin, en fonction des études, certaines valeurs correspondent à des moyennes, d'autres à une valeur mesurée.

In fine, l'échantillon de données comparables compte tenu de toutes les combinaisons possibles entre ces paramètres est tellement réduit qu'il n'a pas été possible d'effectuer un traitement statistique pour en tirer des principes généraux. Ce travail permet de comparer les données collectées dans la littérature aux valeurs maximales d'abattement proposées pour chaque procédé et chaque type de micro-organismes par les différentes directives (en pointillé sur les figures). Ainsi les valeurs guides proposées par les directives font consensus dans

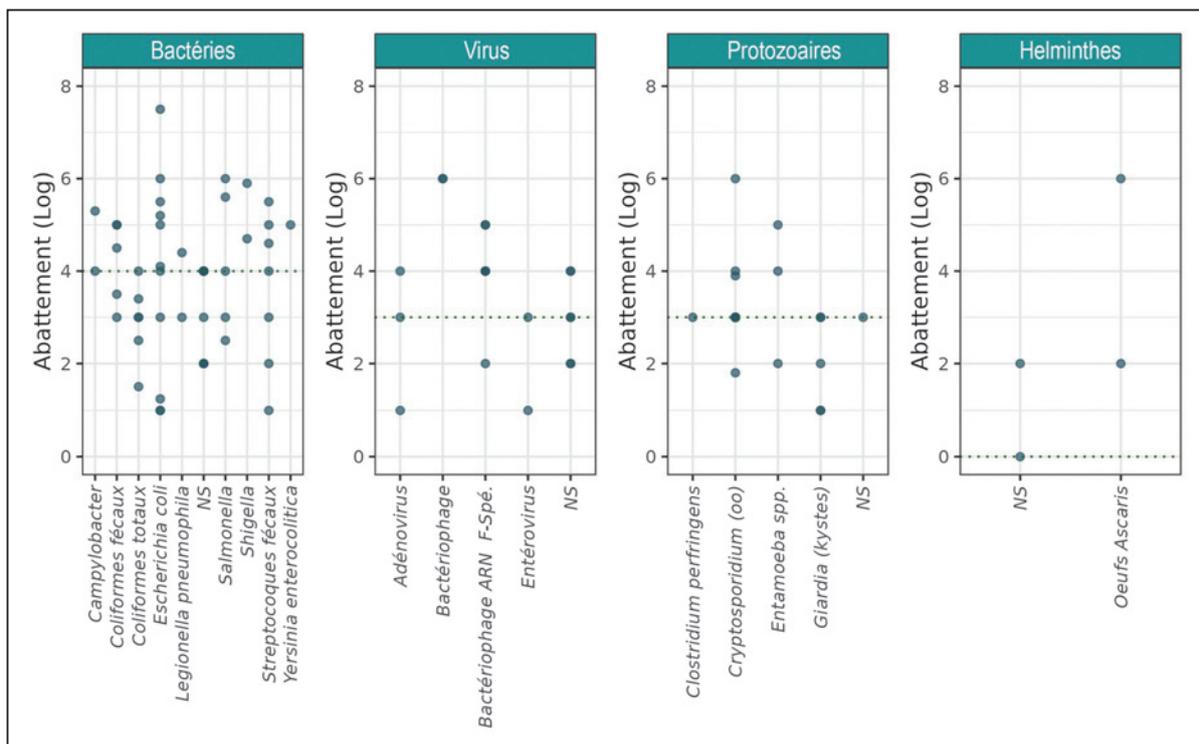


Figure 3. Performance des procédés à boues activées sur les différents indicateurs réglementaires. Les pointillés correspondent aux valeurs guides données par l'OMS [2006]

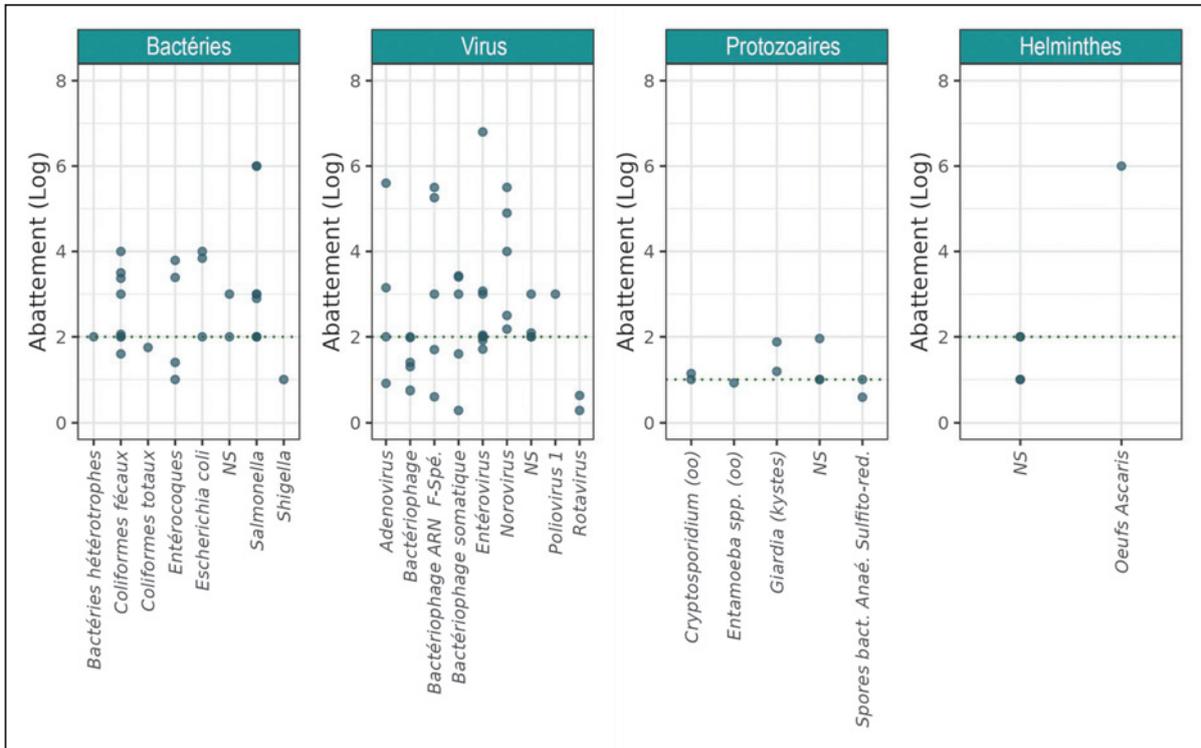


Figure 4. Performance des lampes UV sur les différents indicateurs réglementaires. Les pointillés correspondent aux valeurs guides données par l'OMS [2006]

la littérature et ce sont elles que nous avons choisi de retenir et de présenter dans la suite du document. Les figures 3 et 4 montrent une certaine variabilité autour de ces valeurs. Cette variabilité s'explique par le fait que les travaux scientifiques d'où sont tirées ces valeurs font varier différents paramètres afin d'étudier leurs impacts sur les performances de traitement.

2.2.3. Comparaison des performances des principaux procédés de traitement des eaux usées domestiques sur les micro-organismes

La figure 5 présente les valeurs retenues par l'OMS pour les principaux procédés de traitement des eaux usées. Ces valeurs font consensus dans la littérature. Elles correspondent aux valeurs généralement observées en conditions normales d'exploitation.

Pour un même procédé, les performances ne sont pas forcément homogènes entre les différents types de micro-organismes. Pour la chloration, par exemple, l'abattement est de 6 log sur les bactéries, 3 pour les virus et protozoaires et 1 pour les helminthes. Cela s'explique à la fois par les caractéristiques physiques ou physiologiques des micro-organismes, ainsi que par les mécanismes de traitement à l'œuvre dans les différents procédés. Les procédés de traitements basés sur l'oxydation par exemple (chloration et ozonation) ont de bonnes performances sur les bactéries (et les virus pour

l'ozone), mais moins sur les protozoaires et les helminthes. En effet, les œufs d'helminthes et kystes ou oocystes de protozoaires ont une enveloppe ou une coque qui les protègent de l'oxydation et des rayonnements UV. D'autres procédés mobilisent des mécanismes physiques (filtration, décantation) comme les traitements primaires et les différents types de filtres ou de membranes. Les micro-organismes les plus gros (oocystes de protozoaires, œufs d'helminthes) ou les plus denses sont plus facilement retenus que les plus petits (bactéries, virus). En fonction des objectifs de qualité à atteindre, il peut être nécessaire d'associer différents procédés entre eux pour s'assurer que les différents types de germes sont bien éliminés. C'est par exemple le cas des associations filtres à sable et UV.

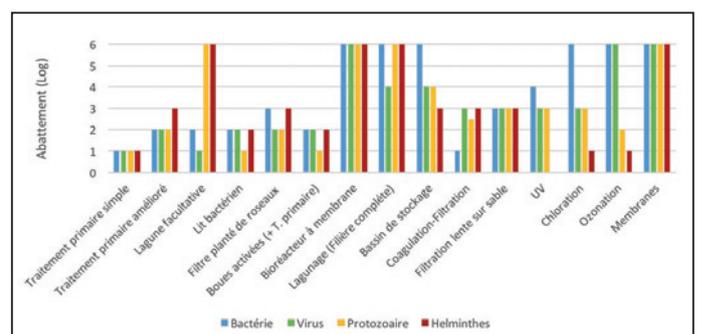


Figure 5. Performances des principaux procédés de traitement des eaux usées. D'après OMS [2006]

2.2.3.1. Traitement primaire

Le traitement primaire constitue une étape préalable et indispensable pour protéger les ouvrages de traitements situés à l'aval. Il cible principalement la pollution particulaire, les huiles et les graisses. Les micro-organismes sont souvent associés à la matière organique (développement en colonies sous forme de biofilm ou de floccs [(TEMPLETON *et al.*, 2008 ; NKURUNZIZA *et al.*, 2009 ; CHAHAL *et al.*, 2016)]. 90 % d'entre eux sont ainsi éliminés par un traitement primaire simple, et jusqu'à 99 % dans le cas d'un traitement primaire amélioré (coagulation-floculation par sels métalliques et polymères). Les germes bactériens piégés dans les boues peuvent être abattus par les conditions anaérobies ou piégés dans les floccs et abattus par leur pH acide [SINCLAIR, 2010 ; DIAS *et al.*, 2017].

L'abattement obtenu par traitement primaire, quoiqu'important, ne permet pas de pratiquer la REUT. Si les abattements constatés dans le cas des traitements primaires améliorés pourraient correspondre à ce qui est attendu par la réglementation pour les classes C et D (tableau II), en revanche et compte tenu des concentrations généralement observées dans les eaux usées brutes (tableau I) les concentrations de sorties resteraient supérieures aux seuils, au moins pour les bactéries.

2.2.3.2. Traitement secondaire

Le traitement secondaire repose sur la dégradation par une culture bactérienne de la matière carbonée dissoute et des nutriments. Ces conditions sont favorables à la mise en œuvre des mécanismes biologiques permettant la biodégradation des pathogènes (compétition, prédation, antagonisme). Les mécanismes de séparation physique des boues secondaires participent aussi à l'abattement des micro-organismes.

Que les cultures soient libres (boues activées, lagune facultative) ou fixées (lit bactérien, filtres plantés de roseaux FPR) les performances sont proches. Ces traitements intervenant systématiquement (à part pour le FPR vertical), après un traitement primaire, par rapport aux eaux usées brutes, les effluents secondaires présentent une réduction de 99 % des micro-organismes : 2-3/2-3/2/2 Log respectivement pour les bactéries/virus/protozoaires et helminthes. Si les abattements peuvent être suffisants pour les classes C et D, en fonction des concentrations dans les eaux usées brutes, les procédés secondaires devront être suivis d'un traitement complémentaire pour tenir les concentrations demandées.

L'association de ces procédés au sein de filières complètes de traitement permet d'atteindre des performances beaucoup plus poussées : 6/4/6/6 Log pour les filières de lagunage naturel ou même 6/6/6/6 log pour

les bioréacteurs à membrane (BRM), respectivement pour les bactéries/virus/protozoaires et helminthes. Les classes B, C, D sont accessibles, ainsi que la classe A pour les BRM.

Les performances sur les micro-organismes de la filière de lagunage naturel (1 bassin anaérobie, 1 bassin facultatif et 3 bassins de maturation en série) reposent sur l'irradiation solaire et la sédimentation qui peut être indirecte par fixation des bactéries aux MES [ANSA *et al.*, 2012]. Les processus biologiques, le temps de rétention hydraulique ainsi que les processus abiotiques comme les hautes températures (> 45 °C) [DIAS *et al.*, 2017] participent également aux abattements. La présence d'algues dans les premiers bassins conduit à une irradiation limitée, mais la photosynthèse permet une augmentation de la concentration en dioxygène dissous et du pH (nuisible à partir de 9,3), favorisant la production d'espèces réactives oxydantes [NOBLE et ROBERTS, 2004 ; DAVIES-COLLEY *et al.*, 2005 ; RUSSO, 2008 ; SINCLAIR, 2010]. Par ailleurs, les algues peuvent être en compétition avec les bactéries pour les sources de carbone et nutriments [ANSA *et al.*, 2012] ou par antagonisme, produire des toxines nocives pour certaines bactéries [NOBLE et ROBERTS, 2004 ; KANTACHOTE *et al.*, 2009 ; DOYLE et ERICKSON, 2012]. Outre la production d'une eau de qualité B, leur volume important permet des effets de stockage, autre dimension importante dans une optique de REUT. Des bassins de lagunage sont ainsi associés à plus de la moitié des projets de REUT en fonctionnement en France [LOMBARD-LATUNE et BRUYÈRE, 2023] et près des trois quarts dans le cas d'usages agricoles.

Les bioréacteurs à membrane ont des performances similaires aux traitements membranaires de désinfection (microfiltration – ultrafiltration). Les 6 log d'abattement s'expliquent par une sélection par la taille, déterminée par le seuil de coupure de la membrane (40-400 µm). Les virus, même de taille inférieure au seuil de coupure, sont éliminés par des processus biologiques, ou retenus par adsorption du fait du développement de biofilm sur la membrane [MARTI *et al.*, 2011 ; HAI *et al.*, 2014 ; XIAO *et al.*, 2019].

2.2.3.3. Les traitements tertiaires

Le traitement tertiaire constitue l'étape de finition de traitement, ciblant notamment la désinfection de l'effluent ou parfois l'abattement de micropolluants. Ses performances sont sensibles à la présence de MES, ou de matière organique, y compris sous forme dissoute (risque d'effet d'écran, ou de colmatage), elles dépendent ainsi des étapes de traitement précédentes [GOMES *et al.*, 2019].

Les réservoirs de stockage et de traitement des eaux usées (RSTEU) dérivent des bassins de maturation du lagunage naturel. Ils ne doivent pas être confondus avec des bassins de stockage, leur dimensionnement répond à des règles précises pour atteindre les performances annoncées [MARA, 2004 ; JUANICÓ et DOR, 2012]. Ils permettent de stocker des eaux usées sur de longues périodes (de plusieurs dizaines de jours à plusieurs mois) jusqu'à leur utilisation pendant la saison d'irrigation. Leur importante profondeur (de 3 et 8 mètres en moyenne, jusqu'à 20 m) permet de limiter l'emprise au sol, l'évaporation et ainsi la salinité des effluents sortants. En contrepartie, leur profondeur limite les mécanismes biologiques et d'irradiation, ce qui est en partie compensé par un temps de séjour qui est théoriquement plus long que dans une lagune de maturation. Si ces réservoirs sont correctement dimensionnés, exploités et entretenus, les performances sont de l'ordre de 6/4/4/3 Log respectivement pour les bactéries/virus/protozoaires et helminthes. En sortie de traitement secondaire, ils pourraient permettre d'atteindre une classe B, voire A. Les performances peuvent être bien plus modestes quand les températures ou la durée de stockage se réduisent [JUANICÓ et MILSTEIN, 2004 ; MARA, 2004 ; JIMÉNEZ *et al.*, 2011 ; EME et MOLLE, 2014].

Les filtres à sable sont utilisés en traitement tertiaire. Plusieurs mécanismes sont mobilisés dans l'abattement des micro-organismes : i) la filtration de surface (œufs d'helminthe et protozoaires) qui se renforce avec le temps ; ii) l'absorption et l'adsorption qui permettent de retenir une partie des bactéries et des virus au sein du média directement et/ou dans le biofilm avec le développement de ce dernier ; iii) Les mécanismes biologiques de compétition, prédation, antagonisme et parasitisme se mettent en place au sein du biofilm et qui permettent l'inactivation de tout ou partie des bactéries et virus. Les performances de la filtration rapide sur sable avec une étape préalable de coagulation floculation sont de 1/3/3/3 Log respectivement pour les bactéries/virus/protozoaires et helminthes. La filtration lente sur sable, sur filtres matures permet d'aller un peu plus loin pour le traitement des micro-organismes de plus petite taille, l'abattement des bactéries gagne ainsi 2 log pour atteindre 3 log sur tous les types de micro-organismes. Placés en sortie de traitement secondaire, les filtres à sable pourraient permettre d'atteindre une classe B.

Le procédé de désinfection par photolyse consiste à exposer l'effluent à traiter au rayonnement ultraviolet (UV) de lampes sélectionnées pour leur longueur d'onde spécifique afin d'irradier les micro-organismes.

En fonction des performances du traitement secondaire (> 15 mg/L MES) une étape de filtration peut être recommandée en amont des lampes UV. Les performances retenues par l'OMS (4/3/3/0 respectivement pour les bactéries/virus/protozoaires et helminthes) correspondent à des doses fortes (de l'ordre de 100 mW·s/cm²). Pour les doses moindres (inférieures à 60 mW·s/cm²) on retiendra plutôt la valeur de 2 log. En revanche les UV sont considérés comme étant sans effets sur les œufs d'helminthes. En fonction des usages ciblés et des procédés secondaires mobilisés en amont, il peut être nécessaire de les compléter par une filtration. Les UV pourraient permettre d'atteindre une classe B.

La chloration est très répandue et nécessite également un effluent secondaire de qualité. Le traitement repose le pouvoir oxydant du chlore, qui va réagir préférentiellement avec les formes azotées. Si la dose est suffisante (concentrations résiduelles de chlore) et le temps de contact important (plusieurs dizaines de mg·min/L) les micro-organismes peuvent être oxydés à leur tour. Le pouvoir oxydant du chlore est moindre que celui de l'ozone (O₃ avec des CT de 2 mg·min/L) mais peut présenter un effet rémanent en cas de concentration résiduelle en réactif [MOLES, 2007]. En sortie de traitement secondaire, la chloration pourrait permettre d'atteindre une classe B, voire A pour l'ozonation.

Les filtrations en surface au moyen d'une membrane ont une efficacité déterminée par la taille des pores. Les membranes de microfiltration ont le seuil de coupure le plus élevé (entre 0,1 et 10 µm) qui leur permet d'éliminer jusqu'à 5 à 6 Log les bactéries, les helminthes, les protozoaires et les macrocolloïdes, mais pas les virus (hormis ceux fixés sur les MES) (jusqu'à 2 Log). L'ultrafiltration selon son seuil de coupure (entre 10 nm à 1 µm), retiendra en plus les virus pour les seuils de coupure les plus fins (jusqu'à 6 Log) ainsi que les polymères et protéines. La nanofiltration retient l'ensemble des pathogènes (7 Log), les sels ionisés multivalents et les molécules plus grandes que 1 à 5 nm. L'osmose inverse retient par sa structure dense l'ensemble des ions et les molécules de taille supérieure, et donc l'ensemble des pathogènes (7 Log). Ces membranes dites absolues, présentent des abattements qui permettent de répondre aux exigences de la classe A, au prix d'une haute dépense énergétique.

2.2.4. Estimation théorique des possibilités de REUT agricole selon les procédés de traitement

Le croisement des obligations réglementaires présentées précédemment (*tableau II, IV, V, et VI*) et des qualités théoriquement atteintes compte tenu des performances

retenues par l’OMS pour les différents procédés de traitement est présenté dans le *tableau VII*. Les caractéristiques choisies pour les eaux usées brutes correspondent à des valeurs hautes, que l’on peut rencontrer dans les petites et moyennes collectivités, là où les activités agricoles sont majoritairement pratiquées. Les concentrations peuvent être plus basses en zone urbaine. Les résultats sont des estimations à la portée limitée puisqu’elles cumulent plusieurs valeurs et donc plusieurs incertitudes. Elles permettent toutefois de proposer des hypothèses qui devront être validées par un suivi. Les possibilités liées à l’approche multibarrière sont celles autorisées par le cadre national basé sur la norme ISO 16075 dont les limites ont déjà été évoquées (§ 1.3). Une application de l’approche plus conforme à la proposition de l’OMS, centrée sur la dose à laquelle chaque catégorie de population est exposée, donnerait des résultats différents.

Le tableau montre que la REUT est conditionnée à la présence d’un traitement complémentaire en sortie de traitement secondaire. Toutefois les traitements physiques grossiers (filtres à sable) ne suffisent pas forcément, ou alors pour les cultures associées à la classe D, voire B avec des barrières. Des traitements plus poussés (bassins de maturation, UV, chloration) permettent en revanche d’atteindre les classes B, C et D, voire A avec des barrières. Quelques combinaisons permettent d’atteindre la classe A sans mobiliser de barrières : les procédés membranaires, les réservoirs de stockage et

de traitement des eaux usées, voire l’ozonation. Ces résultats ne sont que des hypothèses qui doivent être validées par des mesures sur le terrain pour prendre en compte plus finement la qualité des eaux usées à traiter et les performances réelles des procédés en jeu.

Ce tableau montre que l’approche multibarrière, telle qu’elle est appliquée ici, élargi un peu les possibilités pour atteindre la classe A, mais n’offre pas beaucoup de solutions pour les autres classes d’eau. Il serait intéressant de voir ce que donnerait le même exercice en raisonnant sur la dose et pas uniquement sur les concentrations.

Conclusion

L’appel au développement des pratiques de REUT s’est accompagné d’une refonte réglementaire qui a décliné au plan national le cadre européen. L’arrêté de décembre 2023 propose deux voies pour la gestion des risques sanitaires associés aux micro-organismes : une approche centrée sur le traitement avec l’atteinte de qualité poussée, la seconde introduit la possibilité de mettre en place une gestion intégrée des risques sanitaires associés aux germes pathogènes.

Cette gestion repose sur la mobilisation de barrières, ou mesures de protection, présentes potentiellement tout au long de la filière de REUT et qui permettent de contrôler la dose à laquelle les différentes populations sont exposées. Ces barrières peuvent réduire la quantité de micro-organismes ou limiter, voire supprimer une

Traitements	Abattement théorique (B/V/P/H log)	Concentration théorique en sortie (EUB à 8/5/5/3 log)	Classe d'eau et d'usages correspondants	
			Sans barrière	Avec barrières* (nombre)
Traitement primaire	1/1/1/1	7/4/4/2	–	–
Traitement primaire amélioré	2/2/2/3	6/3/3/0	–	–
Traitement secondaire (primaire simple)	2/2/2/2	6/3/3/1	–	–
Filière de lagunage	6/4/6/6	2/1/0/0	B, C, D	A (1), B, C, D
BRM	6/6/6/6	2/0/0/0	B, C, D	A (1), B, C, D
Secondaire + RSTEU	8/6/6/5	0/0/0/0	A, B, C, D	A, B, C, D
Secondaire + coagulation + filtre à sable	3/5/4,5/5	5/0/0,5/0	–	–
Secondaire + filtration lente sur sable	5/5/5/5	3/0/0/0	D	B(3), D
Secondaire + UV	6/5/5/2	2/0/0/1	B, C, D	A (1), B, C, D
Secondaire + chloration	8/5/5/3	0/0/0/0	B, C, D	A (1), B, C, D
Secondaire + ozonation	8/8/4/3	0/0/1/0	A, B, C, D	A, B, C, D
Secondaire + traitement membranaire	8/8/8/8	0/0/0/0	A, B, C, D	A, B, C, D

RSTEU : réservoirs de stockage et de traitement des eaux usées.

* Approche multi-barrière appliquée sur le modèle de la norme ISO 16075.

B/V/P/H : bactéries, virus, protozoaires et helminthes.

Tableau VII. Possibilités théoriques d’usages agricoles en sortie des principaux procédés de traitement

exposition. Le traitement des eaux usées est une barrière, mais d'autres mesures existent. Certaines étaient intégrées dans la précédente réglementation nationale à travers des « contraintes d'usages ». À défaut de réaliser un travail sur mesure pour intégrer dans leur plan de gestion des risques une combinaison de barrières, les projets doivent atteindre des seuils de qualités bien plus poussés que ce qui était requis dans la réglementation précédente et qui vont même bien au-delà de ce qui est attendu pour la baignade. Une revue des principaux procédés de traitement a permis de montrer que seuls quelques procédés permettent d'atteindre la qualité demandée pour la classe A. Le cadre proposé pour la prise en compte des barrières complémentaires permet d'élargir les possibilités, mais reste cependant limité. La méthode proposée par la norme ISO 16075 et reprise par les arrêtés de 2023 pour mettre en place une gestion intégrée des risques favorise la barrière traitement puisque l'efficacité des autres mesures de protection n'est prise en compte qu'à 50 % (le nombre de points de barrières associé à chacune d'elle correspond à la moitié de son abattement estimé). Par ailleurs, elle reste centrée sur les concentrations et ne permet pas de raisonner à l'échelle de la dose, ce qui limite très fortement la portée de l'approche. Des travaux sont en cours [THOMAS et al., 2024] pour développer une méthode d'évaluation des risques à partir

d'une estimation de la dose exposée, qui pourrait permettre de mieux prendre en compte les contributions des différentes barrières, qu'elles agissent sur la concentration en micro-organisme ou sur le volume auquel les populations sont exposées. Cette méthode pourrait permettre de construire les plans de gestion des risques à fournir dans les dossiers de demande d'autorisation réglementaire pour la REUT.

Enfin, il est important de rappeler que l'on estime que le traitement de l'eau est responsable de 5 à 7 % des émissions globales de gaz à effet de serre, soit le double de l'aviation civile [ALIX et al., 2022]. La nécessité de devoir mobiliser des traitements très poussés pour répondre aux exigences du nouveau cadre réglementaire semble discutable au regard de ce qui est attendu pour d'autres pratiques (telles que la baignade...). Cette nécessité couplée à un appel au développement des pratiques, questionne aussi sur la compatibilité avec les engagements de lutte contre le réchauffement climatique pris par la France.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse qui a financé cette étude, et le Programme Solidarité-Eau pour sa contribution à la synthèse bibliographique.

Bibliographie

AFSSA (2008) : *Réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation*. 71 p. Disponible en ligne : <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX-Ra-EauxUsees.pdf>

ALIX A., BELLET L., TROMMSDORFF C., AUDUREAU I. (2022) : *Réduire les émissions de gaz à effet de serre des services d'eau et d'assainissement : Aperçu des émissions et de leur potentiel de réduction illustré par le savoir-faire des services d'eau* (60 p.). IWA Publishing. Disponible en ligne : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-39923-PFEIWA-GES-FR.pdf>

ANSA E.D.O., LUBBERDING H.J., AMPOFO J.A., AMEGBE G.B., GIJZEN H.J. (2012) : « Attachment of faecal coliform and macro-invertebrate activity in the removal of faecal coliform in domestic wastewater treatment pond systems ». *Ecological Engineering* ; 42 : 35-41.

BEAUMONT S., CAMARD J.-P., LEFRANC A., FRANCONI A. (2004) : *Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France*. Rapport ORS ; 220 p. Disponible en ligne : https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/2004/Etude2004_2/REURapport_1_.pdf

CHAHAL C., VAN DEN AKKER B., YOUNG F., FRANCO C., BLACKBEARD J., MONIS P. (2016) : « Pathogen and particle associations in wastewater ». *Advances in Applied Microbiology* ; 97 : 63-119.

DAVIES-COLLEY R.J., CRAGGS R.J., PARK J., SUKIAS J.P.S., NAGELS J.W., STOTT R. (2005) : « Virus removal in a pilot-scale 'advanced' pond system as indicated by somatic and F-RNA bacteriophages ». *Water Science & Technology* ; 51(12) : 107-110.

DIAS D.F.C., PASSOS R.G., VON SPERLING M. (2017) : « A review of bacterial indicator disinfection mechanisms in waste stabilisation ponds ». *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* ; 16 : 517-39.

DOYLE M.P., ERICKSON M.C. (2012) : « Opportunities for mitigating pathogen contamination during on-farm food production ». *International Journal of Food Microbiology* ; 152(3) : 54-74.

EME C., MOLLE, P. (2014) : *Stockage des eaux usées traitées en vue de leur réutilisation : état de l'art*. 75p. Disponible en ligne : <https://hal.inrae.fr/view/index/identifiant/hal-02599147>

EPNAC, LOMBARD-LATUNE R., BRUYERE M. (2023) : *Panorama de la réutilisation des eaux usées traitées en France en 2022*. Disponible en ligne : https://www.oieau.fr/eadanslaville/sites/seine.oieau.fr.oieau.fr.eaudanslaville/files/document-sandre/Panorama_REUT_EPNAC_2022-Nov2023.pdf

FEACHEM R.G., BRADLEY D.J., GARELICK H. MARA D.D. (1983) : *Sanitation and disease : health aspects of excreta and wastewater management* (Vol. 1). New York : Wiley.

- GODFREE A. (2003) : « Health constraints on the agricultural recycling of wastewater sludges ». *Handbook of Water and Wastewater Microbiology* ; 281-98.
- GOMES J., MATOS A., GMUREK M., QUINTA-FERREIRA R.M., MARTINS R.C. (2019) : « Ozone and photocatalytic processes for pathogens removal from water : A review ». *Catalysts* ; 9(1) : 46.
- HAI F.I., RILEY T., SHAWKAT S., MAGRAM S.F., YAMAMOTO K. (2014) : « Removal of pathogens by membrane bioreactors : A review of the mechanisms, influencing factors and reduction in chemical disinfectant dosing ». *Water* ; 6 : 3603-30.
- JIMÉNEZ B., MARA D., CARR R., BRISSAUD F. (eds.) (2011) : « Wastewater treatment for pathogen removal and nutrient conservation: suitable systems for use in developing countries ». In : BAHRI A., DRECHSEL P., RASCHID-SALLY L., REDWOOD M., eds, *Wastewater Irrigation and Health*. Routledge, pp. 175-196. <https://doi.org/10.4324/9781849774666-19>
- JUANICÓ M., MILSTEIN A. (2004) : « Semi-intensive treatment plants for wastewater reuse in irrigation ». *Water Science and Technology* ; 50(2) : 55-60.
- JUANICÓ M., DOR I. (eds.) (2012). *Hypertrophic reservoirs for wastewater storage and reuse: ecology, performance, and engineering design*. Springer Science & Business Media.
- KANTACHOTE D., DANGTAGO K., SIRIWONG C. (2009) : « Treatment efficiency in wastewater treatment plant of Hat Yai Municipality by quantitative removal of microbial indicators ». *Songklanakarin Journal of Science and Technology* ; 31(5) : 567-76.
- LOMBARD-LATUNE R., BRUYÈRE M. (2023) : *Panorama de la réutilisation des eaux usées traitées en France en 2022*. Rapport du groupe de travail EPNAC, Rapport Technique INRAE-OFB, 36 p. Disponible en ligne : <https://www.epnac.fr/media/files/reut/panorama-reut-2022-epnac>
- MARA D.D. (2004) : *Domestic wastewater treatment in developing countries*. Earthscan Publications, London ; Sterling, VA.
- MARTI E., MONCLUS H., JOFRE J., RODRIGUEZ-RODA I., COMA, J., BALCÁZAR J.L. (2011) : « Removal of microbial indicators from municipal wastewater by a membrane bioreactor (MBR) ». *Bioresource Technology* ; 102 : 5004-9.
- MTEC (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires) (2024) : Dossier de Presse « Plan eau, 1 an après. 100 % des mesures engagées ». Disponible en ligne : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/2024.03.25_DP_PLAN%20EAU_1_AN.pdf
- MOLES, J. (2007) : « Eaux de distribution - Désinfection ». *Techniques de l'ingénieur*.
- NKURUNZIZA T., NDUWAYEZU J.B., BANADDA E.N., NHAPI I. (2009) : « The effect of turbidity levels and *Moringa oleifera* concentration on the effectiveness of coagulation in water treatment ». *Water Science & Technology* ; 59(8) : 1551-8.
- NOBLE R., ROBERTS S.J. (2004) : « Eradication of plant pathogens and nematodes during composting: a review ». *Plant Pathology* ; 53(5) : 548-68.
- NRMMC-EPHC-AHMC (2006) *Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks : Phase 1. National Water Quality Management Strategy*. Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, Australian Health Ministers' Conference. Canberra, Australia.
- OMS (2006) : *WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater* (Vol. 4). World Health Organization.
- PIERZO V., DELATTRE J.-M. (2000) : *État de l'art sur l'efficacité des traitements tertiaires de désinfection des eaux résiduaires (chloration, ozonation, UV, infiltration)*. Institut Pasteur de Lille - Agence de l'eau Artois Picardie. 105 p. Disponible en ligne : [https://consultation.eau-artois-picardie.fr/OAI_Docs/aegis/1640/B_10328_\(2.48Mo\).pdf](https://consultation.eau-artois-picardie.fr/OAI_Docs/aegis/1640/B_10328_(2.48Mo).pdf)
- RUSSO R.E. (ed.) (2008) : *Wetlands : ecology, conservation and restoration*. New York : Nova Science Publishers.
- SINCLAIR R.G. (2010) : « Wastewater irrigation and health: assessing and mitigating risk in low-income countries ». *International Journal of Water Resources Development* ; 26(4) : 704-9.
- TEMPLETON M.R., ANDREWS R.C., HOFMANN R. (2008) : « Particle-associated viruses in water: impacts on disinfection processes ». *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* ; 38(3) : 137-64.
- THOMAS A.-R., DECLERCQ R., HASSENFORDER E., MOLLE P., LOMBARD LATUNE R. (2024) : « L'approche multi-barrière comme gestion alternative des risques pathogènes pour la réutilisation des eaux usées traitées ». *Techniques Sciences Méthodes* ; 5 : 95-113.
- UE (2020) : *Règlement (UE) 2020/741 du Parlement européen et du Conseil du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau*. JO L 177 du 5.6.2020, p. 32-55. <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj>
- USEPA (2012) : *Guideline for Water Reuse*.
- XIAO K., LIANG S., WANG X., CHEN C., HUANG X. (2019) : « Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: A critical review ». *Bioresource Technology* ; 271 : 473-81.

Dans l'estuaire de la Vie, la nouvelle STEP maîtrise ses impacts environnementaux

Entretien avec

François Blanchet, Maire de St-Gilles Croix de Vie et président du Pays de St-Gilles Croix de Vie et
Aurélie Taverne, Responsable du service maîtrise d'ouvrage assainissement au Pays de St-Gilles Croix de Vie Agglomération

Depuis 2023, 4 communes du Pays de Saint-Gilles Croix de Vie (Vendée) sont équipées d'une STEP de dernière génération pour leur assainissement. Avec le procédé par boues biologiques granulaires, cet équipement performant sur le plan environnemental ouvre aussi la voie à la réutilisation des eaux usées, prochain enjeu du territoire.

Quelles sont les sources d'inspiration que vous avez suivies pour vous faire une idée de ce projet ?

François Blanchet : Nous visions une réalisation vertueuse et exemplaire pour le respect de l'environnement. Nous avons visité des stations d'épuration en Bretagne et Périgord, avec des systèmes à boues activées classiques. Nous avons finalement choisi un procédé innovant, le traitement par boues biologiques granulaires (procédé Nereda®), qui nous a été proposé par le prestataire.

Aurélie Taverne : L'impact environnemental de la solution retenue est en effet grandement réduit par rapport à une station classique : le traitement par boues biologiques granulaires permet une déphosphatation biologique très poussée (90-95% d'abattement biologique), des consommations en énergie et en réactifs moindres que pour un process à boue activée classique, dans un ensemble industriel compact et ergonomique. 3 stations françaises utilisent déjà ce procédé, mais à une échelle moindre. Notre STEP est la première en France de plus de 100 000 équivalents habitants. À l'étranger, cette technologie est éprouvée depuis près de 15 ans et traite les effluents plus de 6 millions d'équivalents habitants (la STEP de Dublin traite les effluents de 2 millions d'équivalents habitants par exemple).

Est-ce qu'une étude de faisabilité et/ou d'impact a été réalisée sur ce projet ?

A.T. : L'idée initiale était d'implanter la nouvelle station à proximité du site existant. Or, le transfert de la compétence assainissement à l'agglomération a modifié le périmètre géographique de la maîtrise d'ouvrage qui intègre des communes non littorales. Une dérogation à la loi littorale semblait difficile à obtenir auprès du Ministère. L'implantation s'est donc faite dans la zone d'activité économique (ZAE) de Givrand, commune siège de Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie, à proximité des bâtiments administratifs et du centre technique inter-

communal. Un projet de cette nature nécessite de nombreuses études réglementaires et d'impacts : dimensionnement, impact écologique, acoustique, capacité de dispersion des odeurs, dispersion des rejets en mer et impact sur les profils de pêche et de baignade, faisabilité de la valorisation des boues, etc.

F.B. : L'implantation à Givrand éloignait la STEP de l'exutoire dans l'estuaire de la Vie, à 4,5 km, et nécessitait la pose de 10 km de canalisations pour raccorder la 4^e commune, Notre Dame de Riez. Mais nous avons préféré utiliser un terrain déjà propriété de l'intercommunalité et sans habitations à proximité, ce qui résolvait à la fois le problème du foncier et l'impact sur les riverains.

Lors de la phase de diagnostic et de planification, comment la collectivité a-t-elle assuré le bon dimensionnement du projet et l'adhésion des citoyens ?

FB : Concernant l'acceptabilité, c'est celle de l'ancienne station qui était compliquée ! Des associations de protection de l'environnement ont été associées lors de la phase de diagnostic. Globalement, l'ensemble des acteurs était satisfait du projet de nouvelle station. Sur le dimensionnement, notre contrainte forte est la saisonnalité. En été, la population est multipliée par 10 à certains endroits. La capacité a donc été calculée pour la plus forte période d'utilisation, avec une prospective à 20 ans sur la démographie du territoire et le développement d'activité de la ZAE. En effet, la STEP est aussi en capacité de traiter des effluents industriels.

Comment la collectivité a-t-elle financé ce projet et quelles sont les aides sollicitées/obtenues ?

FB : Le coût final de l'opération de construction de la station d'épuration s'élève à 16 662 000 € HT dont 40% (6,7 millions d'€) subventionnés par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne. Pour la partie restant à sa charge, l'intercommunalité a sollicité un Aqua Prêt de la Banque des Territoires d'une valeur de 10 millions d'€.

L'intégralité de l'entretien est à retrouver sur le site aquagir.fr

Acteur engagé au service d'un territoire d'exception et des générations futures



Ensemble, préservons la plus précieuse des ressources : L'EAU



eauxdemarseille.fr

Notre territoire est si précieux



ACCÉLÉRATION.

+50 000
visiteurs

1300
exposants

400
prises de parole

PRIX DE L'INNOVATION TERRITORIALE
avec 8 catégories de prix

9
secteurs d'exposition

2
salons tenus conjointement

Événement majeur pour les décideurs territoriaux, le **SALON DES MAIRES ET DES COLLECTIVITÉS** éclaire les territoires autour des enjeux auxquels ils sont confrontés. C'est un espace de rencontres, d'échanges et de partage qui propose des solutions adaptées aux besoins de chacun.

Cette édition sera tenue conjointement avec le **SALON DES SPORTS ET PARASPORTS** et accueillera un nouveau salon : le **SALON DE LA BIODIVERSITÉ ET DU GÉNIE ÉCOLOGIQUE**. Face au dérèglement climatique, les solutions par la nature sont un levier essentiel pour l'adaptation du territoire !

Alors que la fin du mandat approche, c'est le moment de finaliser les projets et programmes menés par les communes et intercommunalités. L'édition 2024 marquera donc le temps de l'**ACCÉLÉRATION**.

DÉVELOPPEMENT, ATTRACTIVITÉ & COHÉSION TERRITORIALES | SANTÉ, SOCIAL, ENFANCE & VIVRE ENSEMBLE
NUMÉRIQUE & CONNECTIVITÉ | ÉNERGIE & CLIMAT | CULTURE, LOISIRS & ÉVÉNEMENTS
SÉCURITÉ, PRÉVENTION & PROTECTION | ENVIRONNEMENT & CADRE DE VIE | CONSTRUCTION & AMÉNAGEMENT
SPORTS & PARASPORTS | BIODIVERSITÉ & GÉNIE ÉCOLOGIQUE

19-21 NOVEMBRE 2024 | Paris – Porte de Versailles

www.salondesmaires.com

Tenue conjointe avec



Organisé par

