



**EHESP**

---

**Ingénieur du Génie Sanitaire  
PERSAN  
Avril 2010**

---

**RISQUES SANITAIRES LIÉS À LA REUTILISATION  
D'EAUX USEES TRAITÉES POUR  
L'AÉROASPERSION DES ESPACES VERTS**

---

**Albane BEAUPOIL  
Caroline LE BORGNE  
Charlotte MUCIG  
Axelle ROUX**

## Remerciements

---

Nous tenons à remercier Marie TEYSSANDIER, Ingénieur du Génie Sanitaire et coordinatrice scientifique du groupe de travail « Réutilisation des Eaux Usées Traitées » de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail, pour ses conseils et les informations qu'elle a pu nous transmettre.

## Sommaire

---

Liste des sigles et acronymes .....	3
Table des figures et tableaux.....	4
INTRODUCTION .....	5
I. Etat des lieux de la réutilisation des eaux usées en France .....	6
1. Au niveau mondial, la REU est en plein essor [1].....	6
2. Intérêt de la REU en France.....	7
3. Exemples de réutilisation d'eau usée traitée .....	8
4. REUT par aéroaspersion et réglementation.....	10
a. L'avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France de 1991 .....	10
b. Les nouvelles recommandations du CSHPF de 2000 .....	10
c. Les nouvelles recommandations de l'OMS .....	11
d. Projet d'arrêté sur la réutilisation des eaux usées en France .....	11
II. Objectifs et cadrage de l'étude évaluative des risques sanitaires .....	12
1. Rappel de l'objectif de l'étude .....	12
2. Schéma conceptuel .....	12
a. Populations exposées .....	12
b. Voies et milieux d'exposition.....	13
III. Risque microbiologique, niveaux de contamination des eaux usées et traitements tertiaires .....	14
1. Les eaux usées : un réservoir de contaminants microbiologiques .....	14
a. Dangers d'origine virale .....	14
b. Dangers bactériens .....	15
c. Dangers parasitaires.....	16
2. Parc français des STEP et traitements des eaux usées .....	16
a. Etat des lieux des traitements appliqués dans les STEP .....	16
b. Application de la directive n°91/271/CEE du 21 mai 1991.....	17
3. Abattement des contaminants par les traitements tertiaires .....	17
IV. Survie des agents pathogènes dans l'environnement .....	18
1. Facteurs physiques, chimiques et biologiques influençant la survie des pathogènes dans l'environnement.....	18
a. Facteurs physiques.....	19
b. Facteurs chimiques .....	19
c. Facteurs biologiques .....	20
2. Focus sur la survie des virus dans l'environnement.....	20
3. Focus sur la survie des bactéries dans l'environnement .....	21
V. Aéroaspersion des espaces verts et risque microbiologique : quels agents pathogènes retenir ? .....	21
1. Proposition d'une méthodologie de sélection des agents pathogènes.....	21
2. Discussion.....	23
3. Exemple d'évaluation qualitative du risque sanitaire : <i>Salmonella</i> .....	25
VI. Réflexion sur une évaluation quantitative des risques sanitaires liés à l'aéroaspersion d'espaces verts .	27
1. Un grand nombre de paramètres à considérer pour évaluer les expositions .....	27
2. Faisabilité d'une EQRS.....	28

VII. Recommandations quant à la réutilisation d'eaux usées pour l'aérospersion d'espaces verts urbains	29
1. Recommandations liées à l'aérospersion d'eaux usées traitées (adapté de [20])	29
2. Choix d'indicateurs de suivi	30
CONCLUSION	32
BIBLIOGRAPHIE	33
ANNEXES	35
Annexe 1 : Les techniques de traitement des eaux usées	35
Annexe 2 : Classement des agents biologiques fixé par l'article R 4421-3 du Code du travail relatif à la protection des travailleurs	37
Annexe 3 : Liste des agents pathogènes présents dans les eaux usées, appartenant aux groupes 2, 3 ou 4 de l'article R4421-3 ou étant soumis à déclaration	38
Annexe 4 : Identification des dangers et réflexion sur le risque sanitaire lié	42
A. <i>Campylobacter spp.</i>	43
B. <i>Escherichia coli</i>	46
C. <i>Legionella</i>	47
D. <i>Leptospira</i>	50
E. <i>Salmonella</i>	52
F. <i>Shigella</i>	54
G. <i>Vibrio cholerae</i>	55
H. Virus Coxsackie	56
I. Echovirus	56
J. Virus de l'Hépatite A	58
K. Rotavirus	59
L. <i>Cryptosporidium</i>	59
M. <i>Giardia</i>	60
N. <i>Naegleria Fowleri</i>	60
O. <i>Ascaris</i>	61

## Liste des sigles et acronymes

---

AFSSA	Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
AFSSET	Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
BEH	Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire
CSHPF	Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
DMI	Dose Minimale Infectieuse
EH	Equivalent Habitant
EQRS	Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires
ERP	Etablissement Recevant du Public
IFEN	Institut Français de l'Environnement
InVS	Institut de Veille Sanitaire
MEDD	Ministère du Développement Durable
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ORS	Observatoire Régional de la Santé
RESE	Réseau d'Echanges en Santé Environnementale
REU	Réutilisation des Eaux Usées
REUT	Réutilisation des Eaux Usées Traitées
STEP	Station d'Épuration
TAR	Tour Aéro-Réfrigérante
THM	Trihalométhanes
UFC	Unité Formant Colonie
UFP	Unité Formant Plage
US EPA	US Environmental Protection Agency
UV	Ultra Violet
VTR	Valeur Toxicologique de Référence

## Table des figures et tableaux

---

Figure 1 : Volume moyen journalier des eaux recyclées en Europe et quelques pays méditerranéens .....	6
Figure 2 : Schéma conceptuel.....	13
Figure 3 : Méthodologie de sélection des microorganismes pathogènes.....	24
Figure 4 : Températures de survie et températures optimales de développement des légionnelles .....	47
Figure 5 : Evolution du nombre de cas de légionelloses .....	48
Tableau 1 : Bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées traitées [1] .....	8
Tableau 2 : Caractéristiques des sites pratiquant la réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage d'espaces verts en France (adapté de [2]) .....	9
Tableau 3 : Recommandations du CSHPF (1991) concernant l'aéropersion des eaux usées réutilisées....	10
Tableau 4 : Valeurs limites de la qualité microbiologique des eaux réutilisées et restrictions associées (CSHPF, Projet d'arrêté, 2000).....	11
Tableau 5 : Définition des termes de l'étude .....	12
Tableau 6 : Présence de virus humains dans les eaux usées brutes et traitées [5] .....	15
Tableau 7 : Rendement des procédés d'épuration en unité log [11].....	17
Tableau 8 : Traitements tertiaires et abaissement des niveaux de contamination microbienne.....	18
Tableau 9 : Facteurs influant sur la survie des virus dans les sols [15] .....	20
Tableau 11 : Paramètres à considérer pour l'évaluation des expositions .....	28
Tableau 12 : Agents pathogènes présents dans les eaux usées, appartenant aux groupes 2, 3 ou 4 de l'article R4421-3 ou étant soumis à déclaration.....	41
Tableau 13 : Pathogénicité, transmission et épidémiologie de quelques agents pathogènes .....	43
Tableau 14 : Conditions de croissance de <i>Campylobacter</i> spp. ....	43
Tableau 15 : Sources d'exposition à risque légionnelles mises en évidence en 2008.....	49
Tableau 16 : Durée de survie des virus entériques dans le sol .....	57

## INTRODUCTION

---

En France, la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures et espaces verts urbains est peu pratiquée. Les contraintes de distance avec le public imposées par la réglementation limitent cette pratique. De plus, d'une façon générale, les besoins en eaux sont satisfaits et l'indice de stress hydrique est modéré.

Toutefois, les ressources en eaux sont inégalement réparties sur le territoire national et certaines zones géographiques sont sujettes à des sécheresses récurrentes en été. Ces inégalités peuvent justifier l'intérêt de la réutilisation d'eaux usées traitées et plusieurs projets se développent à l'échelle régionale, notamment en zone méditerranéenne.

En ce sens, l'AFSSA a publié en novembre 2008 un avis concernant cette pratique mais uniquement dans le cadre d'une irrigation en agriculture et n'a pas pris en compte le risque sanitaire lié à l'aéroaspersion. Le présent rapport vise donc à déterminer si l'utilisation d'eaux usées traitées, dans le cadre d'un arrosage par aéroaspersion des espaces verts urbains, présente un risque sanitaire pour le public.

Il s'agit d'identifier les dangers liés à l'aéroaspersion d'eaux usées traitées et, si possible, en fonction de la dose réponse, du devenir des agents et de l'exposition, de proposer une évaluation quantitative du risque sanitaire lié à cette aéroaspersion, sans contrainte de distance vis-à-vis du public et en tenant compte des traitements tertiaires pratiqués dans les stations d'épuration.

Il convient de préciser que seul le risque microbiologique sera étudié dans ce rapport. Une étude du risque chimique devra être réalisée ultérieurement pour pouvoir statuer sur l'ensemble des risques sanitaires liés à l'aéroaspersion d'eaux usées traitées.

Après un état des lieux de la réutilisation des eaux usées traitées en France et de la réglementation associée à l'arrosage d'espaces verts par ces eaux, le rapport s'attachera à décrire les traitements tertiaires des eaux usées disponibles et leur action sur la flore microbienne. Le devenir des agents microbiologiques dans l'environnement sera aussi étudié. Il s'agira ainsi d'identifier les dangers associés à l'aéroaspersion d'eaux usées traitées. Pour cela, une méthodologie de sélection des agents pathogènes à considérer comme prioritaires lors de l'aéroaspersion sera alors proposée. Enfin, une réflexion sur une quantification du risque sanitaire lié à l'aéroaspersion sera réalisée.

## I. Etat des lieux de la réutilisation des eaux usées en France

Aujourd'hui, la réutilisation des eaux usées (REU) est un enjeu politique et socio-économique. Elle représente une ressource alternative en eau permettant de limiter les pénuries et de mieux préserver les ressources naturelles en limitant les prélèvements d'eau dans les milieux fragilisés. La REU contribue à la gestion intégrée de l'eau.

### 1. Au niveau mondial, la REU est en plein essor [1]

La REU a connu un développement rapide ces dix dernières années avec une croissance des volumes de l'ordre de 10 à 29% par an en Europe, aux Etats Unis et en Chine, et jusqu'à 41% en Australie. Le volume journalier actuel des eaux réutilisées est de 1,5-1,7 millions de m<sup>3</sup> dans plusieurs pays comme la Californie, la Floride, le Mexique ou la Chine. Certains pays européens méditerranéens ont aussi des objectifs ambitieux : réutiliser 100 % des eaux usées à Chypre et, à Madrid, satisfaire 10% de la demande en eau par la réutilisation.

Avec le développement de la REU, de nouvelles réglementations ont vu le jour. Par exemple, le plan AGUA du gouvernement espagnol prévoit l'usage exclusif des eaux usées traitées pour l'irrigation des golfs. En Italie, le décret du 12 Juin 2003 fixe les normes techniques pour la réutilisation des eaux usées traitées. De même, au Québec, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs a sollicité l'expertise de l'Institut national de santé publique du Québec afin de produire un avis quant aux risques potentiels liés à l'utilisation d'eaux usées domestiques traitées pour l'irrigation des terrains de golf.

La France, pour sa part, est en retard, particulièrement en ce qui concerne l'irrigation des golfs et des espaces verts bien que cet usage soit celui qui connaisse la plus forte croissance dans les pays limitrophes et dans le monde (cf. **figure 1**). Cette situation n'est pas le fait de la population : une enquête TNS SOFRES de 2006 menée dans les Alpes Maritimes a montré le soutien des français à cette réutilisation : 72% sont tout à fait favorable à l'arrosage des espaces verts publics et 26% sont plutôt favorables. A l'heure actuelle, l'opinion publique et les élus locaux soutiennent vivement la réutilisation des eaux usées.

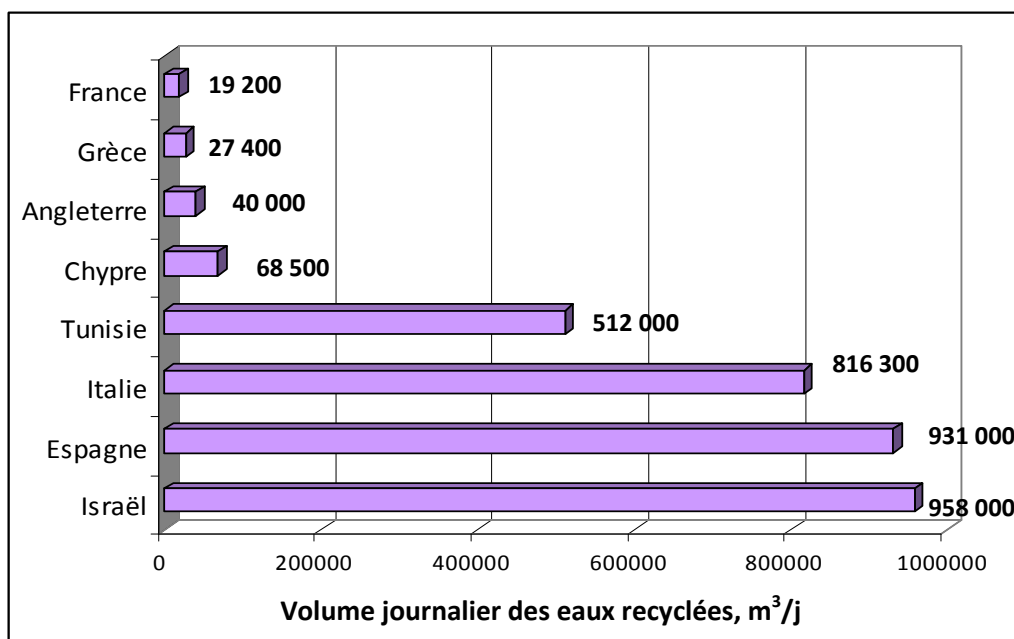


Figure 1 : Volume moyen journalier des eaux recyclées en Europe et quelques pays méditerranéens (Données 2000-2003) [1]



## 2. Intérêt de la REU en France

La France a des ressources en eau abondantes et ne connaît pas l'état de pénurie. L'indice de stress hydrique, estimé à 15%, est modéré. La consommation nette globale est de l'ordre de 12km<sup>3</sup> par an et les ressources en eau mobilisables sont pour la France métropolitaine de l'ordre de 175 km<sup>3</sup>[1]. Une particularité de la France est la demande élevée du secteur industriel (du fait des centrales thermiques et nucléaires) et du secteur municipal qui inclut l'arrosage des espaces verts et parfois l'irrigation des golfs.

Néanmoins, des disparités dans le temps et l'espace existent sur le territoire français : variation de la pluviométrie, climat, densité de population... Les récentes sécheresses récurrentes dans le sud du pays et les mesures de rationnement associées en témoignent. En septembre 2006, 75 départements ont été concernés par la sécheresse et 51 ont adopté un Arrêté de restriction ou d'interdiction portant sur les prélèvements et les usages d'eau. Dans certaines de ces zones des difficultés à maintenir une agriculture irriguée et à créer et entretenir les espaces verts apparaissent aujourd'hui.

Les difficultés d'approvisionnement en eau ne représentent pas la seule motivation de la REU. Le souci de protéger les environnements récepteurs sensibles (baignades, zones conchylicoles, réserves naturelles, cours d'eau dégradés), notamment en période d'étiage où les débits sont réduits, est une autre motivation bien réelle. En effet, la REU contribue à la préservation de la qualité des milieux en permettant de réduire les prélèvements d'eaux des rivières en été et en diminuant la surexploitation des nappes qui entraîne parfois l'assèchement de zones humides et leur contamination en facilitant l'infiltration d'eaux polluées [2].

D'autres avantages peuvent être attribués à la REU. Le **tableau 1** résume les bénéfices liés à la réutilisation des eaux usées traitées mais aussi les limites et contraintes, qui expliquent le retard actuel dans la matière en France.

Intérêt, avantages et bénéfices	Défis et contraintes
<p><b>1. Ressource alternative</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmenter la ressource en eau et la flexibilité d'approvisionnement.</li> <li>• Différer le besoin de mobilisation d'autres ressources en eau.</li> <li>• Assurer une ressource fiable, disponible et indépendante des sécheresses pour l'irrigation.</li> </ul> <p><b>2. Conservation et préservation des ressources</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Economiser l'eau potable pour la réserver aux usages domestiques.</li> <li>• Contrôler la surexploitation des ressources souterraines.</li> </ul> <p><b>3. Aspects législatifs et sanitaires</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contribuer au déploiement de la Directive Cadre sur l'Eau.</li> <li>• Anticiper la compatibilité avec les nouvelles tendances réglementaires.</li> </ul> <p><b>4. Valeur économique ajoutée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eviter les coûts du développement, du transfert et de pompage de nouvelles ressources en eau fraîche.</li> <li>• Réduire ou éliminer l'utilisation des engrais chimiques en irrigation.</li> <li>• Assurer des revenus complémentaires grâce à la vente de l'eau recyclée.</li> <li>• Favoriser le tourisme des régions arides.</li> </ul>	<p><b>1. Aspects législatifs et sanitaires</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Problèmes de santé publique liés aux pathogènes potentiellement présents dans les eaux usées traitées.</li> <li>• Absence de réglementation et des incitations à la réutilisation.</li> <li>• Droit sur l'eau : qui possède l'eau recyclée et qui récupère les revenus ?</li> <li>• Exploitation inappropriée et/ou qualité non conforme.</li> </ul> <p><b>2. Aspects sociaux légaux</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceptation publique de la réutilisation.</li> <li>• Répartition des responsabilités et gestion des litiges.</li> </ul> <p><b>3. Aspects économiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Financement des infrastructures (traitement tertiaire et réseau de distribution) et des coûts d'exploitation.</li> <li>• Demande saisonnière et besoin de stockage.</li> <li>• Faible prix de l'eau potable pour les agriculteurs.</li> <li>• Responsabilité pour la perte du revenu de la vente d'eau potable.</li> </ul>

<p><b>5. Valeur environnementale</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduire les rejets de polluants dans le milieu récepteur.</li> <li>• Améliorer et maintenir les plans d'eau en cas de sécheresse.</li> <li>• Eviter la construction de nouveaux barrages ou réservoirs.</li> <li>• Améliorer le cadre de vie (espaces verts).</li> <li>• Proposer une alternative fiable aux rejets d'eaux usées dans les milieux sensibles (zones de baignade ou conchylicoles...).</li> <li>• Profiter des nutriments apportés par l'eau usée traitée pour augmenter la productivité des cultures agricoles et la qualité des espaces verts.</li> <li>• Protéger les cours d'eau menacés par l'eutrophisation.</li> <li>• Protéger le milieu marin en limitant les rejets d'effluents sur le littoral.</li> </ul> <p><b>6. Développement durable</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduire les coûts énergétiques et environnementaux par rapport à ceux de l'exploitation des aquifères profonds, du transport d'eau à longues distances, du dessalement...</li> <li>• Assurer une ressource alternative à coût modéré pour les régions arides, la protection des milieux sensibles et la restauration des zones humides.</li> <li>• Augmenter la production alimentaire en cas d'irrigation.</li> </ul>	<p><b>4. Aspects environnementaux et agronomiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Présence de sels et autres micropolluants pouvant avoir des effets négatifs sur certaines cultures et sols.</li> </ul> <p><b>5. Aspects technologiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande fiabilité d'exploitation requise.</li> <li>• Importance du choix de la filière de traitement.</li> </ul>
--	--

*Tableau 1 : Bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées traitées [1]*

Enfin, de nombreuses collectivités locales, pour protéger des plages ou des zones conchylicoles, ont dû ajouter à leur station d'épuration des moyens de désinfection et des systèmes d'élimination de l'azote et du phosphore. Le résultat est une eau traitée d'excellente qualité qui pourrait être une ressource alternative intéressante pour l'arrosage des espaces verts et des terrains de sports ainsi que le nettoyage des rues.

### 3. Exemples de réutilisation d'eau usée traitée en France

Entre 1981 et 1997, les difficultés d'approvisionnement en eau et le souci de protéger les environnements sensibles ont été à l'origine d'une vague d'installations d'eaux usées urbaines traitées. Les exemples les plus connus sont situés sur les îles de Noirmoutier, Ré, Oléron et Porquerolles et à Pornic (Loire Atlantique) (situations de pénuries locales des ressources en eau) ; au Mont Saint Michel et à Saint Armel (Morbihan) (protection du milieu marin) ; au Mesnil en Vallée (Maine et Loire) et à Clermont Ferrand (protection des cours d'eau de l'eutrophisation). Malgré ces belles réussites, le nombre des opérations se limitaient à une vingtaine [1].

Depuis, quelques terrains de golf supplémentaires ont été équipés pour être arrosés avec des eaux usées traitées. Le **tableau** suivant détaille les aspects techniques de différents dispositifs de REUT pour l'arrosage d'espaces verts et de terrains de sport.

Sites	Classe de qualité	Usages	Date de mise en route	Surfaces irriguées (ha)	Volumes utilisés	Période d'utilisation	Type de station	Capacité (EH)	Installations d'irrigation en place
Baden (Morbihan)	A	Golf	1989	70	250 m <sup>3</sup> /j	Mai – octobre	Lagunages	2000	Bassins de stockage
Bormes Le Lavandou (Var)	A	Golf	1994	20 à 30	250 000 m <sup>3</sup> /an	Toute l'année	Procédé physico-chimique Biofiltres à pouzzolane	15000	Epandage souterrain Puits de pompage Réserve de 30 000 m <sup>3</sup> Réseau d'irrigation par aspersion
Chanceaux sur Choisille (Indre et Loire)	A	Terrains de sport  Jardins publics	1993	5		Suivant les besoins	Boues activées	4000	Lagunage de finition Station de pompage 400 m de canalisations (réseau enterré) Bouches d'arrosage et asperseurs
Grasse (Alpes Maritimes)	A	Golf	1992	30	10 à 20 m <sup>3</sup> /j	Saison estivale	Système enterré Cuves avec agitateurs Bacs de décantation Filtration lente sur sable	80 à 100	3 bassins de stockage
Pornic (Loire Atlantique)	A	Golf	1992	34	1200 m <sup>3</sup> /j	Avril – octobre	Boues activées avec aération prolongée Déphosphatation Chloration- déchloration Filtre à sable	22 000	Station de refoulement 5 kms de canalisations Bassins de stockage
Saint Palais sur Mer (Charente Maritime)	A	Golf	1991	55 à 60	2000 m <sup>3</sup> /j en pointe	Mars – octobre	Boues activées Filtration Chloration	175 000	Lagunes de stockage sur le golf Réseau d'irrigation par aspersion
Saint Pierre (Charente Maritime)	A	Golf	1994	25	400 m <sup>3</sup> /j	Mars - septembre	Boues activées Traitement UV	1200	Bâche de pompage 7 kms de canalisation Lagune de stockage Station de filtration et UV 16 néons

*Tableau 2 : Caractéristiques des sites pratiquant la réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage d'espaces verts en France (adapté de [2])*

## 4. REUT par aérospersion et réglementation

La réglementation française et la manière dont elle est appliquée ont joué et jouent un rôle décisif dans la situation actuelle de la REU dans notre pays. En France, le cadre normatif est essentiel : les décideurs ont besoin d'une réglementation fiable pour approuver les projets de réutilisation. Mais des normes trop restrictives peuvent freiner les projets.

### a. L'avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France de 1991

La première réglementation concernant la REU à des fins d'arrosage et d'irrigation date de la fin des années 80 : il s'agit de développer la réutilisation sans risque pour la santé publique et l'environnement. C'est le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France qui l'élabore. Pour cela il s'inspire des recommandations de l'OMS publiées en 1989. Les « Recommandations sanitaires concernant l'utilisation des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation des cultures et des espaces verts » [3] seront pourtant plus restrictives, notamment en ce qui concerne les risques liés à l'aérospersion (cf. **tableau 3**). Une limite de 100 m entre les arrosages et les habitations est imposée ainsi que d'autres exigences (rideaux d'arbres, asperseurs de courte portée, aspersion en dehors des heures d'ouverture...).

Les contraintes de distance et la restriction de l'arrosage en dehors des heures d'ouverture limitent sérieusement la possibilité de réutiliser les eaux usées traitées pour l'arrosage des espaces verts, même si la qualité microbiologique de l'eau réutilisée est haute. Les espaces verts sont en effet souvent proches d'habitations et de pelouses arrosées par aérospersion. Ils ne sont pas clôturés et leur accès n'est pas obligatoirement réglementé. Cette remarque concerne aussi les terrains de golf autour desquels des lotissements ont souvent été bâtis.

Aujourd'hui ces exigences réglementaires expliquent pourquoi la réutilisation peine à se développer en France.

Conditions de réutilisation	Paramètres microbiologiques		Commentaires
	Œufs d'helminthes (ténia, ascaris)	Coliformes thermotolérants	
Terrains de sports et jardins ouverts au public	< 1 /L	< 1000 /100 ml	Irrigation par aspersion en dehors des heures d'ouverture ; Distance > 100 m des habitations
Irrigation par aspersion des cultures, prairies, pâtures et espaces verts inaccessibles au public	< 1 /L	Aucune contrainte	Les terrains de sports concernés sont ceux utilisés plusieurs semaines après l'arrosage ; Distance > 100 m des habitations ; Ecrans pour les aérosols ; Protection du personnel d'exploitation

*Tableau 3 : Recommandations du CSHPF (1991) concernant l'aérospersion des eaux usées réutilisées*

### b. Les nouvelles recommandations du CSHPF de 2000

Entre 1999 et 2000, le CSHPF se penche à nouveau sur la réglementation de la réutilisation pour l'arrosage et l'irrigation de cultures et d'espaces verts. Mais le texte est une nouvelle adaptation des recommandations de l'OMS de 1989[4]. La modification la plus notable est la modulation des règles de distance en fonction des milieux concernés et des niveaux de qualité de l'eau d'arrosage. La distance par rapport aux habitations est ramenée de 100 à 50 m pour le plus

haut niveau de qualité (cf. **tableau 4**). Dans la pratique cette recommandation limite toujours l'arrosage des espaces verts en milieu urbain.

Paramètres	Niveau de qualité A
Type d'usage	Cultures maraichères consommées crues ; arbres fruitiers et pâturages irrigués par aspersion ; espaces verts ouverts au public (golfs, terrains de sport...).
E. coli/100 ml	< 1000
Salmonelles/L	Absence
Œufs de ténia /L	Absence
Autres restrictions	Distance < 50 m des habitations, voies de circulation, conchyliculture et baignade et < 20 m des lacs et rivières. Pour les espaces verts, aspersion en dehors des heures d'ouverture au public.

*Tableau 4 : Valeurs limites de la qualité microbiologique des eaux réutilisées et restrictions associées (CSHPF, Projet d'arrêté, 2000)*

### c. Les nouvelles recommandations de l'OMS

Une troisième édition des recommandations de l'OMS relative à la réutilisation des eaux usées en agriculture a été publiée en septembre 2006 [5]. L'aspersion n'y est que rapidement évoquée. Elle n'a pas fait l'objet d'évaluation quantitative des risques, faute de références relatives aux doses infectantes par voie respiratoire et de données suffisantes pour une évaluation quantitative de l'exposition au risque.

### d. Projet d'arrêté sur la réutilisation des eaux usées en France

D'après l'article R.211-23 du Code de l'Environnement, « les eaux usées peuvent, après épuration, être utilisées à des fins agronomiques ou agricoles, par arrosage ou par irrigation, sous réserve que leurs caractéristiques et leurs modalités d'emploi soient compatibles avec les exigences de protection de la santé publique et de l'environnement. Les conditions d'épuration et les modalités d'irrigation ou d'arrosage requises, ainsi que les programmes de surveillance à mettre en œuvre, sont définis, après avis de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail et de la mission interministérielle de l'eau, par un arrêté du ministre chargé de la santé, du ministre chargé de l'environnement et du ministre chargé de l'agriculture ».

Le projet d'arrêté fixe les prescriptions sanitaires et techniques applicables à l'utilisation d'eaux usées traitées à des fins d'irrigation de cultures ou d'espaces verts. L'irrigation doit se faire de manière gravitaire ou localisée ; tout projet d'irrigation par aéroaspersion pourra être autorisé à titre expérimental, après avis favorable de l'AFSSET sur la demande d'expérimentation.

A ce titre, le Directeur général de la santé et la Directrice de l'eau et de la biodiversité ont saisi l'AFSSET, le 30 juillet 2009, pour avis sur ce projet d'arrêté. Cette saisine prévoit un rendu d'expertise par l'AFSSET en 2 temps :

- sous deux mois, un avis sur le projet d'arrêté afin de permettre l'irrigation par des eaux usées traitées sans aspersion (sans production d'aérosols) ;
- à moyen terme, une note d'étape et une évaluation des risques sanitaires liés à l'aspersion des eaux usées traitées. Ceci permettra la signature d'un arrêté modificatif réglementant la réutilisation des eaux usées traitées par aspersion.

## II. Objectifs et cadrage de l'étude évaluative des risques sanitaires

### 1. Rappel de l'objectif de l'étude

La principale demande de réutilisation des eaux usées est incontestablement l'arrosage des espaces verts et des terrains de sport, notamment les terrains de golf. En restant dans le cadre de la réglementation française actuelle, les possibilités sont limitées : les espaces verts peuvent être arrosés avec des eaux de catégorie A (cf. tableau 4), mais à condition d'utiliser des systèmes d'irrigation localisées ou enterrés (du fait de la contrainte de distance vis-à-vis des habitations). L'irrigation souterraine est coûteuse et des asperseurs à portée très limitée empêchent l'arrosage de la majorité des espaces verts constitués de vastes pelouses. Une modification de la réglementation apparaît indispensable.

Il s'agit donc d'étudier dans ce rapport le risque sanitaire lié à l'aéroaspersion d'espaces verts par des eaux usées traitées, **sans contrainte de distance** vis-à-vis du public et des habitations avoisinantes, et en tenant compte des traitements tertiaires pratiqués dans les stations d'épuration. Le **tableau 5** définit les termes du sujet.

Terminologie	Définition et cadrage de l'étude
Aéroaspersion	<ul style="list-style-type: none"><li>• L'aéroaspersion produit des aérosols qui sont susceptibles d'entrer en contact avec les usagers des espaces verts.</li><li>• Ici un arrosage par aéroaspersion automatique est considéré.</li></ul>
Espace vert	<ul style="list-style-type: none"><li>• Le terme d'espace vert désigne, en urbanisme, tout espace d'agrément planté de fleurs, d'arbres ou engazonné. Pour être qualifié d'espace vert, un site doit répondre à plusieurs critères informellement définis : il doit être assez grand, être ouvert au public et facilement accessible (un rond-point fleuri n'est pas un espace vert) à pied et généralement en vélo.</li><li>• Le concept "espaces verts" englobe les parcs et jardins, les espaces boisés ou cultivés, publics ou privés des zones urbaines et périurbaines.</li><li>• Les terrains de sport sont aussi considérés.</li></ul>
Traitement tertiaire des eaux usées	<ul style="list-style-type: none"><li>• Niveau avancé de traitement, utilisé lorsque l'effluent est rejeté dans un milieu récepteur sensible ou lorsque l'eau doit être réutilisée.</li><li>• Processus accompli à l'aide de divers procédés physiques, chimiques ou biologiques afin d'éliminer les polluants ciblés.</li><li>• Le traitement tertiaire permet de réduire le nombre de germes présents dans l'eau traitée et peut notamment être réalisé par ozonation ou désinfection au chlore, par un traitement aux UV ou par une filtration sur sable.</li></ul>

*Tableau 5 : Définition des termes de l'étude*

### 2. Schéma conceptuel

#### a. Populations exposées

Les espaces verts, souvent intégrés au cœur des villes ou à leur périphérie, sont des lieux de vie. Les usagers s'y promènent, jouent, pratiquent des activités sportives, s'allongent sur les terrains gazonnés... La réutilisation d'eaux usées traitées dans le cadre de l'aéroaspersion d'espaces verts et de terrains de sports est donc susceptible d'exposer plusieurs types de populations à ces eaux. Deux populations principales sont à considérer :

- les usagers des espaces verts et des terrains de sports,
- les habitants des logements riverains des espaces verts arrosés.

Parmi ces populations, certaines peuvent être considérées comme plus « sensibles » : c'est notamment le cas des enfants, qui peuvent fréquenter régulièrement les espaces verts.

Il est important de noter que le présent rapport a ciblé son évaluation sur la portée sanitaire pour l'usager et le riverain de la réutilisation des eaux usées traitées par aérospersion et il est précisé que le risque pour les professionnels ne sera pas évalué.

## b. Voies et milieux d'exposition

L'homme peut se retrouver en contact avec l'eau usée traitée utilisée pour l'aérospersion des espaces verts urbains et péri-urbains et des terrains de sport. Le schéma conceptuel des voies d'exposition potentielles explique comment l'homme peut être exposé (cf. figure 2).

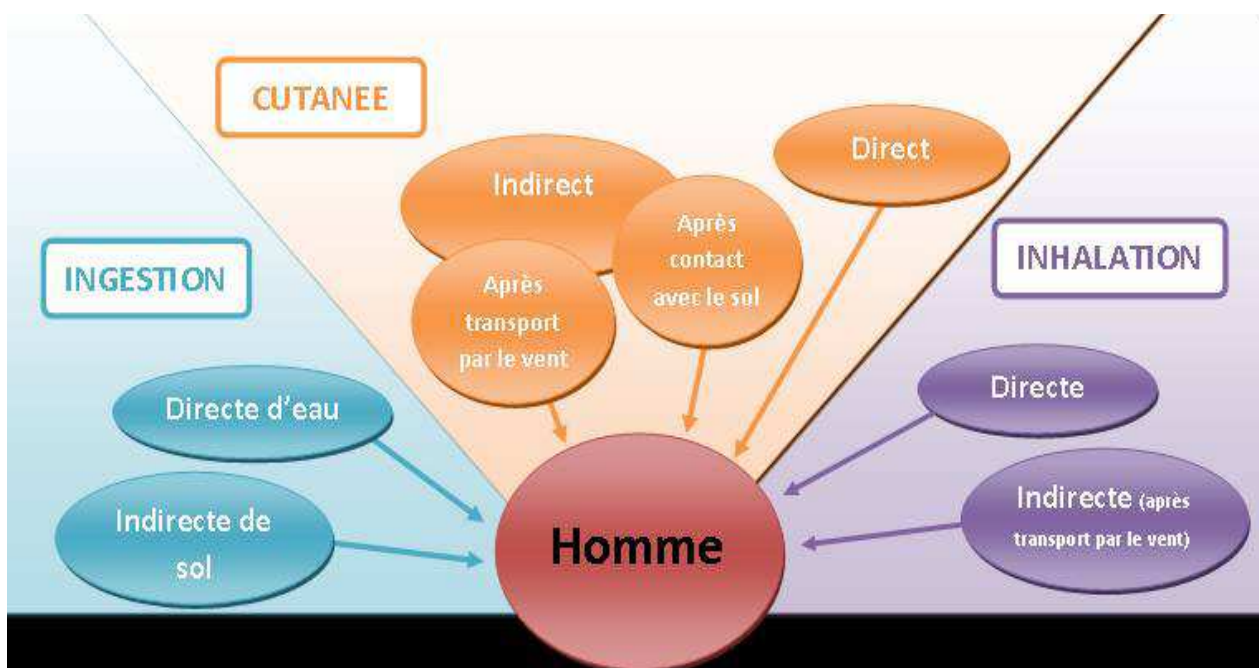


Figure 2 : Schéma conceptuel

L'homme peut être exposé de différentes façons aux eaux usées traitées lors de l'arrosage des espaces verts : d'une manière que l'on peut qualifier de directe (contact avec l'eau usée traitée à proximité de la source d'exposition, volontaire ou accidentel) ou d'une manière indirecte (via un média) dont il n'a pas forcément connaissance ou qu'il ne souhaite pas.

Les trois voies d'exposition, à savoir l'ingestion, le contact cutané et l'inhalation sont à considérer dans un premier temps si l'on tient uniquement compte des usages et des habitudes des populations dans les espaces verts.

En ce qui concerne **l'inhalation**, l'homme pourra être en contact avec l'eau usée traitée lorsqu'il se trouve dans l'espace vert ou à proximité (transport des aérosols produits par le vent) uniquement lorsque l'aérospersion est en fonctionnement.

En ce qui concerne **le contact cutané**, l'homme pourra avoir un contact direct avec l'eau aspergée s'il se trouve à proximité immédiate de l'aéroaspergeur en fonctionnement. Il pourra aussi être exposé de façon indirecte via un contact avec un sol arrosé (contact main/sol, corps/sol s'il est allongé sur une pelouse récemment arrosée par exemple) ou suite à un transport d'aérosols par le vent.

En ce qui concerne **l'ingestion**, l'homme sera exposé de façon directe à l'eau usée traitée s'il avale l'eau aspergée, volontairement (exemple d'un enfant jouant avec l'arroseur) ou involontairement. L'ingestion de sol arrosé peut aussi être considérée (cas d'un enfant atteint du syndrome PICA).

Le schéma conceptuel met donc en évidence les voies d'exposition à considérer dans la cadre d'une aérospersion d'eaux usées traitées. Ces voies d'exposition doivent maintenant être mises en relation avec les micro-organismes éventuellement présents dans les eaux usées traitées et les doses émises.

### **III. Risque microbiologique, niveaux de contamination des eaux usées et traitements tertiaires**

---

#### **1. Les eaux usées : un réservoir de contaminants microbiologiques**

Les eaux usées sont fortement chargées en contaminants divers, chimiques et biologiques, et leur composition est extrêmement variable en fonction de leur origine : eaux usées industrielles issues de l'agroalimentaire, du secteur de l'automobile, eaux usées domestiques... Elles peuvent ainsi transporter de nombreuses substances chimiques sous forme solide ou dissoute et une variété de micro-organismes, fécaux ou non, pathogènes ou non.

Selon leurs caractéristiques physico-chimiques ou biologiques et en fonction du danger sanitaire qu'elles représentent les composants des eaux usées peuvent être classés en quatre groupes : les micro-organismes, les matières en suspensions, les éléments traces minéraux ou organiques et les substances nutritives.

Les micro-organismes représentent un danger sanitaire majeur qu'il faut prendre en compte lors de la réutilisation d'eaux usées épurées. Dans les eaux usées, traitées ou non, leur diversité est considérable et leurs concentrations variables d'un microorganisme donné à un autre. Par ordre croissant de taille, les microorganismes potentiellement présents sont les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes. Pour la grande majorité, ils sont issus de matières fécales. Certains sont pathogènes, d'autres non. Ici, dans le cadre d'une évaluation des risques sanitaires, seuls les micro-organismes pathogènes pour l'homme seront considérés. Rappelons que la charge en agents pathogènes dans les eaux usées brutes est fonction de l'état sanitaire de la population à l'origine de ces eaux usées.

Les principaux micro-organismes pathogènes présents dans les eaux usées de France métropolitaine sont : salmonelles, shigelles, campylobactéries, *Escherichia coli* entéro-pathogènes, virus entériques, *Cryptosporidium* sp et *Giardia intestinalis*. D'autres pathogènes peuvent être présents dans les zones tropicales des DOM TOM comme *Vibrio cholerae* ou *Schistosoma mansoni* [2]

#### **a. Dangers d'origine virale**

Les virus sont des organismes infectieux de petite taille (10 nm à 350 nm) qui envahissent un organisme hôte afin d'utiliser les constituants de ses cellules pour se multiplier. Ils ne sont pas naturellement présents dans les intestins, mais proviennent d'une infection intentionnelle (vaccins) ou accidentelle.



Dans son rapport sur les virus transmissibles par voie orale [6], l'AFSSA s'est intéressée aux virus transmissibles par les eaux et les denrées alimentaires. Certains virus ont été identifiés comme transmissibles par les eaux usées. Il s'agit par exemple des calicivirus (norovirus et sapovirus), des virus de l'hépatite A et E, des entérovirus, des paréchovirus, des adénovirus, des rotavirus et des astrovirus. Ces virus entériques sont responsables de pathologies très diverses et notamment de gastro-entérites.

Au niveau européen, les concentrations en virus entériques dans les eaux usées brutes et dans les eaux usées traitées sont estimées respectivement dans des fourchettes de 1 à 10<sup>4</sup> UFP/L et 0 à 10<sup>3</sup> UFP/L [5]. Les fluctuations sont en partie dues aux contextes sanitaires des pays (cf. **tableau 6**).

Virus	Site	Date	Eaux usées brutes		Eaux usées traitées		Référence
			Culture cellulaire	Biologie moléculaire	Culture cellulaire	Biologie moléculaire	
Norovirus	Pays Bas	Nov 98 – Avr. 99		5.10 <sup>3</sup> à 8.10 <sup>5</sup> PDU/L		9.10 <sup>2</sup> à 8.10 <sup>3</sup> PDU/L	(Lodder et De Roda Husman, 2005)
Rotavirus							
Entérovirus et réovirus (sur BGM)			10 <sup>2</sup> à 10 <sup>3</sup> UFP/L	5 à 100 UFP/L			
Norovirus	Pays Bas			10 <sup>5</sup> UG/L		10 <sup>3</sup> UG/L	(van den Berg <i>et al.</i> , 2005)
Adénovirus	Etats-Unis					10 <sup>5</sup> génomés/L	(He et Jiang, 2005)
Astrovirus	France			10 <sup>6</sup> à 10 <sup>8</sup> équivalent génomés/L		10 <sup>3</sup> à 10 <sup>5</sup> équivalent génomés/L	(Le Cann <i>et al.</i> , 2004)
Norovirus	Grande Bretagne			10 <sup>7</sup> UG/L		10 <sup>5</sup> UG/L	(Laverick <i>et al.</i> , 2004)

(UFP : unité formant plage, UG : unité génome, PDU : PCR détectable unité)

**Tableau 6 : Présence de virus humains dans les eaux usées brutes et traitées [5]**

## b. Dangers bactériens

Les bactéries sont des organismes unicellulaires (0,1 à 10 µm), procaryotes, pathogènes ou non. Dans les intestins, les bactéries sont naturellement présentes et en grande quantité. Certaines de ces bactéries sont des indicateurs de contamination fécale : c'est le cas d'*Escherichia coli* et des entérocoques fécaux. Ces bactéries se retrouvent dans nos fèces à hauteur de 10<sup>12</sup> bactéries/g [7, 8] puis dans les eaux usées à une concentration en *E. coli* de 10<sup>9</sup> UFC/L et en entérocoques fécaux de 10<sup>8</sup> UFC/L selon l'OMS, 2006 [5].

Un grand nombre de bactéries pathogènes peuvent être détectées dans les eaux usées, dont la présence n'est pas forcément corrélée à celle des germes témoins de contamination fécale. Trois des bactéries les plus représentées et responsables d'infections intestinales sont *Salmonella sp*, *Shigella sp* et *E. coli* entéropathogène. D'autres bactéries, ubiquitaires des milieux hydriques et pouvant provoquer des infections non entériques se retrouvent aussi dans les eaux usées (bactéries des genres *Pseudomonas*, *Campylobacter*, *Legionella*...).

Notons que le CHSPF, en cohérence avec les recommandations de l'AFSSA, classe les eaux usées destinées à la réutilisation pour l'arrosage des espaces verts dans la catégorie A, correspondant à une teneur en *E. coli* inférieure à 10<sup>4</sup>/L, soit un abattement minimal de 5 log vis-à-vis des chiffres OMS des concentrations dans les eaux usées.

## c. Dangers parasitaires

Les **protozoaires** sont des organismes unicellulaires eucaryotes, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart sont des organismes parasites qui se développent aux dépens de leur hôte. Ils peuvent adopter une forme de résistance au cours du cycle parasitaire, appelée kyste, pouvant résister à certains procédés de traitement des eaux usées. *Cryptosporidium* et *Giardia* sont les plus connus et peuvent utiliser l'eau comme vecteur de dissémination de leurs formes infectantes.

Les **helminthes** sont des vers pluricellulaires majoritairement parasites. Leurs œufs sont très résistants et peuvent notamment survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols ou les plantes. La concentration en œufs d'helminthes dans les eaux usées est de l'ordre de 10 à 10<sup>3</sup> œufs/L [7, 9]

## 2. Parc français des STEP et traitements des eaux usées

### a. Etat des lieux des traitements appliqués dans les STEP

Les eaux usées domestiques collectées sont en grande partie assainies dans les stations d'épuration (STEP). Les différents polluants contenus dans les eaux sont extraits au fur et à mesure par des processus physiques, chimiques et biologiques. Les résidus résultant de ces traitements sont des boues constituées essentiellement d'eau, de sels minéraux et de matières organiques, qui peuvent être en partie recyclées.

En France, les STEP sont au nombre d'environ 17 300 en 2004 (IFEN, [10]) pour une capacité totale de plus de 89 millions équivalents-habitants. De nombreuses stations sont de très petite taille : 50% des stations ont une capacité théorique inférieure à 500 EH. Seul 2% des stations ont une capacité de plus de 50 000 EH, mais elles concentrent à elles seules 57% de la capacité totale de traitement.

En 2004, les stations ont traité environ 7 milliards de m<sup>3</sup> d'eaux usées (eaux usées domestiques et eaux pluviales) par différents dispositifs. Ainsi, trois niveaux de traitement sont distingués (détaillés en annexe 1) :

- Les **traitements primaires** consistent uniquement à effectuer des opérations mécaniques (dégrillage, décantation, filtration...) afin d'éliminer les matières en suspension (déchets volumineux, sables) et les corps gras ;
- Les **traitements secondaires** correspondent soit à des traitements biologiques consistant à mettre en contact l'eau usée avec des micro-organismes épurateurs (systèmes de boues activées, lits bactériens), soit à des traitements physico-chimiques avec ajout de réactifs afin d'éliminer les matières en solution dans l'eau (matières organiques, substances minérales).

La connaissance de l'abattement de tel ou tel type de micro-organisme en fonction du mode de traitement est difficilement accessible et n'est pas quantifiable précisément : seules des fourchettes, en unités log, et généralisées aux grandes familles de microorganismes pour des traitements primaires et secondaires sont données. Le **tableau 7** récapitule ces informations. L'ensemble des abattements sont inférieurs aux 5 log recommandés par le CHSPF pour les bactéries (Seul le lagunage permet d'atteindre au maximum 6 log d'abattement de la contamination bactérienne, il peut être utilisé en traitement secondaire ou tertiaire).

Etape de traitement	virus	bactéries	protozoaires	helminthes
Décantation primaire				
Simple	0-1	0-1	0-1	1-2
Physico-chimique	0-1	1-2	0-1	1-3
Boues activées	1-2	1-3	1-2	1-2
Lits bactériens	0-1	0-2	0-1	
Lagunage (30 jours)	1-4	1-6	2-3	2-3

*Tableau 7 : Rendement des procédés d'épuration en unité log [11]*

- **Les traitements tertiaires** : physiques ou chimiques, ils sont essentiellement utilisés afin d'éliminer les excès d'azote et de phosphore toujours présents dans les eaux usées ayant subi un traitement secondaire. Mais certains traitements tertiaires, appelés aussi techniques d'affinage, apportent une étape supplémentaire de désinfection. Ils s'appliquent principalement à des eaux rejetées dans des milieux sensibles, ou destinées à un usage spécifique (comme l'arrosage de cultures ou d'espaces verts par exemple).

Les eaux usées traitées par des traitements tertiaires peuvent acquérir une qualité bactériologique de même niveau que les eaux de surface (pour exemple, les eaux usées traitées de la station d'épuration de la ville de Noirmoutier présentent des concentrations en coliformes fécaux comprises entre  $10^2$  et  $10^3$  UFC/100 mL en hiver et 10 UFC/100 mL l'été).

Aujourd'hui, en France, seuls 8% des volumes d'eaux usées ne reçoivent qu'un traitement primaire. 45% subissent en plus un traitement secondaire et 47% un traitement secondaire et tertiaire.

## **b. Application de la directive n°91/271/CEE du 21 mai 1991**

Le type de traitement à appliquer aux eaux usées d'une collectivité peut être fixé. La directive n° 91/271/CEE du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires impose des obligations de collecte et de traitement des eaux usées. Les niveaux de traitement requis et les dates d'échéance de mise en conformité sont fixés en fonction de la taille des agglomérations d'assainissement et de la sensibilité du milieu récepteur du rejet final :

- traitement plus rigoureux à l'échéance du 31/12/1998 pour les agglomérations de plus de 10000 EH rejetant dans une des zones sensibles délimitées par l'arrêté du 23 novembre 1994 ;
- traitement plus rigoureux à l'échéance du 31/08/2006 pour les agglomérations de plus de 10000 EH rejetant dans une des zones sensibles délimitées par l'arrêté du 31 août 1999 ;
- traitement secondaire à l'échéance du 31/12/2000 pour les agglomérations de plus de 15000 EH rejetant en zones non sensibles ;
- traitement secondaire ou approprié (selon la taille de l'agglomération et le type de milieu de rejet) à l'échéance du 31/12/2005 pour les autres agglomérations, y compris les agglomérations de moins de 2 000 EH équipées d'un réseau de collecte.

## **3. Abatement des contaminants par les traitements tertiaires**

Les traitements tertiaires les plus couramment utilisés visent à diminuer les charges en nitrates et phosphore des eaux pour limiter l'eutrophisation des cours d'eaux en aval des STEP. Seuls les traitements permettant un abatement des micro-organismes seront traités dans ce rapport, à savoir les différents types de filtration et de désinfection chimique. L'annexe 1 rappelle le principe de ces différents processus tertiaires.

Les données du **tableau 8** sont extraites du rapport de l'US EPA, 2004 [12]. Le traitement tertiaire peut être un traitement chimique par chloration. Mais de nombreuses contraintes sont associées à cette méthode (maîtrise des concentrations en matière organique et formation de trihalométhanes (THM) toxiques pour l'homme en particulier) et elle n'est donc pas recommandée par l'US EPA. En ce qui concerne l'ozonation, les contraintes d'usage sont facilitées mais les coûts sont plus importants.

Des résultats très intéressants sont obtenus avec les rayonnements UV, et notamment une efficacité prouvée contre les formes parasitaires *Cryptosporidium* et *Giardia*, sans les contraintes de la chloration. Aujourd'hui, de plus en plus de stations d'épuration ont recours ou souhaitent recourir à cette méthode.

La microfiltration, quant à elle, est performante en ce qui concerne l'abattement des bactéries mais pas celui des virus (plus petits, ils passent au travers de la membrane filtrante). L'ultrafiltration désinfecte « à 100% ». L'utilisation des telles membranes supposent cependant une gestion technique irréprochable et des coûts importants (coûts d'entretien voire remplacement des membranes et gestion des difficultés liées au colmatage).

DESINFECTION	Caractéristiques, atouts et contraintes	Niveaux d'abattement
Chloration -	Dépend du pH, température, temps de contact, matières organiques interférentes. Formation de sous produits dont THM.	Bactéries ++ Virus + Œufs, cystes (parasites) - Insuffisant pour <i>Giardia</i> et <i>Cryptosporidium</i>
Ozonation +	Oxydant puissant, contribue à l'abattement de la turbidité, pas de sous-produits. Plus cher qu'une chloration.	
UV, 254 nm ++	Pas de sous-produit, coût modéré. De plus en plus utilisé.	Bactéries ++ Virus + Parasites ++ Efficace contre <i>Giardia</i> et <i>Cryptosporidium</i>
FILTRATION		Niveaux d'abattement
Sables		Matières en suspension ++ Bactéries adsorbées +
Microfiltration 0,1-1 µm		Bactéries (3 à 6 log) ++
Ultrafiltration 0,01-0,1 µm		Bactéries et protozoaires (100%) +++ Virus (4 à 6 log) ++
LAGUNAGE		Cf. tableau 6

*Tableau 8 : Traitements tertiaires et abaissement des niveaux de contamination microbienne (Source : US EPA, [12])*

## IV. Survie des agents pathogènes dans l'environnement

### 1. Facteurs physiques, chimiques et biologiques influençant la survie des pathogènes dans l'environnement

Des facteurs physiques et chimiques peuvent influencer la survie des pathogènes dans l'environnement. Evaluer le taux d'inactivation du microorganisme dans l'environnement est donc essentiel pour pouvoir modéliser l'exposition.

D'une façon générale, sauf cas particuliers, les mêmes principes de survie dans l'environnement s'appliquent pour l'ensemble des microorganismes.

## a. Facteurs physiques

### • Température :

- En général, les pathogènes ont tendance à **s'inactiver avec l'augmentation de la température**, et leur survie est plus faible à haute température.
- Beaucoup de pathogènes survivent à des températures basses, mais une inactivation est parfois possible (cas de certaines bactéries).
- L'inactivation thermique est aussi dépendante de l'humidité (plus le milieu est humide, moins l'inactivation est grande).

### • Humidité :

- Une **atmosphère sèche ou peu humide inactive les microorganismes**.
- Mais ils ont aussi tendance à moins survivre dans une atmosphère trop humide.

### • Rayonnements :

- Les rayonnements UV de 200 nm à 330 nm dégradent les acides nucléiques.
- Les rayons X, alpha, beta, gamma ont le plus souvent une action antimicrobienne mais n'ont pas d'action sur les spores.
- L'activité ionisante de l'atmosphère n'est pas antimicrobienne.
- La survie des bactéries, phages et virus à l'obscurité est plus importante qu'à la lumière.
- Influence du rayonnement solaire : **en été, les bactéries persistent moins dans l'environnement**. Une étude de Sinton et al. (2002) [13] a montré que l'inactivation des coliformes fécaux et des entérocoques dans une eau de rivière est plus forte en été qu'en hiver, et beaucoup plus importante le jour que la nuit.

### • Pression atmosphérique :

- La plupart des microbes survivent à la pression atmosphérique.
- Quelques pathogènes peuvent supporter des très fortes pressions (notamment les spores et les oocystes).

## b. Facteurs chimiques

### • pH :

- le pH peut jouer un rôle sur l'adsorption des microorganismes sur phase solide (adsorption favorisée à pH basique).
- Les pathogènes du tube digestif peuvent supporter de faibles pH.

• Matière organique : elle a un rôle protecteur pour les microorganismes qui s'y adsorbent (adsorbés, les microorganismes sont moins sensibles aux facteurs environnementaux comme les rayonnements).

### • Adsorption sur phase solide :

- Les microorganismes peuvent être adsorbés ou inclus dans des particules. L'association des microorganismes avec des particules solides ou entre eux est généralement protectrice. Cette protection dépend du type d'association et varie en fonction de la composition des particules.
- Les particules organiques sont très protectrices.
- Les biofilms protègent les microorganismes.
- La protection des particules inorganiques est très variable. Les particules opaques protègent des rayonnements et quelques particules inorganiques sont anti microbiennes : argent, cuivre et autres métaux lourds.

• Traitements désinfectants : les microorganismes les moins résistants aux désinfections sont les bactéries et les protozoaires sont les plus résistants.

### c. Facteurs biologiques

- Activité microbienne : l'activité microbienne est une activité biologique que l'on retrouve notamment dans le traitement biologique des stations d'épuration.
- Activité protéolytique : les bactéries peuvent dégrader les virus.
- Prédation microbienne : les virus et les bactéries peuvent être phagocytés.
- Biofilms : les biofilms ont différents rôles (protection, dégradation et modification). Il existe une compétition microbienne dans le biofilm (certains agents peuvent empêcher la multiplication d'autres agents).

Dans le cadre de l'aérospersion d'eaux usées traitées sur des espaces verts, les facteurs physiques influençant la survie des microorganismes doivent être prioritairement considérés. En effet, très souvent les collectivités auront recours à l'aérospersion en été, pour faire face aux situations de pénurie d'eau. Les conditions environnementales caractéristiques de la période estivales (températures élevées, humidité faible, rayonnements UV intenses) auront un effet direct sur les microorganismes et leur survie. La survie des germes est favorisée par un ensoleillement réduit, une humidité relative > 70% et une température faible (<15°C) et sera donc compromise pour un arrosage en été.

Les facteurs chimiques (excepté les traitements de désinfection) et biologiques ont une influence négligeable sur la survie des microorganismes dans le cadre de l'aérospersion des espaces verts.

## 2. Focus sur la survie des virus dans l'environnement

La résistance des virus dans l'environnement et notamment dans les sols est dépendante de la température, de la dessiccation, du pH, des cations présents dans le sol, de la nature du sol et de l'ensoleillement, notamment via les rayons UV qui agissent directement sur la particule virale. Le **tableau 9** récapitule les facteurs influents. L'effet de l'ensoleillement a été mis en évidence par Hurst en 1998 [14], qui rapporte que le taux d'inactivation virale dans l'eau en l'absence de lumière solaire est compris entre 0,7 et 0,8 log par jour alors que pour un plein ensoleillement le taux d'inactivation est de 2,4 log par jour.

Facteurs	Commentaires
Température	L'élévation de température est facteur le plus préjudiciable
Dessiccation	Facteur très préjudiciable aux virus. La dessiccation augmente l'inactivation virale dans les sols.
Ensoleillement	Peut être préjudiciable directement au niveau de la surface du sol et indirectement par augmentation de la température.
pH	Affecte indirectement la survie des virus en contrôlant leur adsorption et leur désorption des particules de sol.
Cations	Certains cations (Mg) ont un effet de thermostabilisation des virus. Les cations peuvent aussi favoriser l'adsorption des virus sur les sols. Or, les virus semblent survivre plus longtemps à l'état adsorbé.
Nature du sol	Les argiles et les substances humiques augmentent la rétention d'eau par les sols et de ce fait augmentent la survie des virus sensibles à la dessiccation.
Facteurs biologiques	Pas de notion claire en ce qui concerne l'action de la microflore du sol alors que, il y a quelques évidences de synthèse de substances virucides par la microflore des eaux.

*Tableau 9 : Facteurs influant sur la survie des virus dans les sols [15]*

En ce qui concerne le comportement des virus dans les sols, les virus demeurent dans les couches superficielles en règle générale. Ainsi Hurst et al [14] ont montré qu'après contamination d'un sol avec du poliovirus, 91% des virus sont récupérés dans la couche supérieure de 2,5 cm (5,6% dans la couche comprise entre 2,5 et 10 cm et 3,4 % entre 10 et 25 cm de profondeur).

### 3. Focus sur la survie des bactéries dans l'environnement

Une étude des facteurs influençant la survie des indicateurs de contamination fécale (*Escherichia coli*) et des germes pathogènes (*Salmonella thyphi* séro groupe C et *vibrio cholerae*) dans les eaux usées dans des microcosmes recréés en laboratoire a révélé que ces groupes bactériens sont capables de survivre pendant des périodes non négligeables (> 7 jours) et à des concentrations importantes. Le suivi de la viabilité de ces populations bactériennes pendant une période de 7 jours, a montré que le phénomène de survie dans les eaux usées est influencé par un certain nombre de facteurs environnementaux, notamment, le biotope d'origine de la souche, la nature du milieu de survie (milieu récepteur), le pH et la **température**. Le suivi du pourcentage des cellules blessées ou agressées, a permis de mettre en évidence une nouvelle stratégie de survie, matérialisée par une capacité de réparation de ces cellules agressées (diminution du pourcentage de ces cellules) [16].

## V. Aéroaspersion des espaces verts et risque microbiologique : quels agents pathogènes retenir ?

---

Les eaux usées, traitées ou non, contiennent une multitude de microorganismes potentiellement pathogènes. Quels agents pathogènes pour l'homme faut-il alors retenir pour évaluer le risque sanitaire dans le cadre de l'aéroaspersion d'espaces verts urbains et de terrains de sport ?

Rappelons que le risque d'infection d'origine hydrique par les agents pathogènes est dépendant d'un ensemble de facteurs qui incluent d'une part leurs concentrations, la capacité de ces agents microbiologiques à survivre dans l'environnement, la qualité du traitement d'épuration de l'eau, et d'autre part la dose infectante, l'exposition et la susceptibilité de la population exposée. En prenant en compte l'ensemble de ces facteurs, évoqués dans les parties II, III et IV, tentons de définir une méthodologie de sélection des microorganismes d'intérêt sanitaire lors de l'aéroaspersion d'espaces verts urbains et péri-urbains et de terrains de sport.

### 1. Proposition d'une méthodologie de sélection des agents pathogènes

Il s'avère quasiment impossible d'établir une liste exhaustive des agents microbiologiques présents dans les eaux usées. En effet, les microorganismes sont très divers (virus, bactéries, parasites) et leur concentration et présence varient en fonction des heures, des mois, des saisons. Malgré tout, il existe une diversité d'agents pathogènes présentant un risque infectieux dans les eaux usées [17]. Pour des questions de faisabilité de l'étude des risques sanitaires liés à l'aéroaspersion d'eaux usées traitées, il est impossible d'évaluer le risque lié à chaque microorganisme pathogène. Il est donc impératif de développer une méthodologie de sélection pour dégager les principaux microorganismes d'intérêt sanitaire en France métropolitaine et dans les DOM-TOM. En ce sens, nous proposons une méthodologie, représentée ci-dessous sous la forme d'un logigramme (cf. **figure 3**), qui sera détaillée pas à pas ci-après.

Tout d'abord, à partir de données bibliographiques, nous avons dressé une première liste, la plus complète possible (mais non exhaustive), des agents biologiques susceptibles d'être présents dans les réseaux d'assainissement et les eaux usées [18, 19]. Deux types de ressources d'informations, le classement des agents biologiques dans la réglementation professionnelle et la liste des pathogènes responsables d'une Maladie à Déclaration Obligatoire, ont aussi été utilisés.

Le classement des agents biologiques est fixé par l'article R 4421-3 du Code du travail relatif à la protection des travailleurs contre les risques résultant de leur exposition à des agents biologiques. Cet article classe les agents biologiques en quatre groupes en fonction de l'importance du risque d'infection qu'ils représentent. Le groupe 1 comprend les agents biologiques non susceptibles de provoquer une maladie chez l'homme. Les agents du groupe 2 à 4 peuvent provoquer une maladie chez l'homme, et selon le groupe auquel ils appartiennent, représenter un danger et un risque de propagation dans la collectivité de plus en plus important. L'existence de prophylaxie ou de traitement efficace rentre également en compte dans le classement (cf. article en **annexe 2**).

En recoupant la première liste d'agents pathogènes à celles des deux recueils cités, un nombre plus restreint d'agents dangereux a été déterminé. La liste ainsi obtenue est présentée en **annexe 3**.

L'étape suivante a consisté à obtenir des informations sur ces pathogènes et particulièrement leur répartition dans le monde pour ne conserver que les agents présents en France métropolitaine et d'outre-mer. La plupart des données sur les pathogènes sont issues des fiches de l'Agence de la Santé Publique du Canada.

Ensuite, il s'agissait de déterminer quels sont les agents pathogènes qui sont encore présents après un traitement tertiaire des eaux usées et leur concentration après le traitement (*pour rappel, l'aéropersion des espaces verts ne doit concerner que des eaux usées ayant subi un traitement tertiaire*). Il est important de noter, à ce niveau, que tous les traitements tertiaires n'ont pas les mêmes performances (cf. tableau 8).

Le schéma conceptuel élaboré dans la partie II montre que, même si l'inhalation d'aérosols semble la voie d'exposition prépondérante, les voies d'exposition possibles sont à la fois l'inhalation, l'ingestion et le contact cutané. A cette étape, il faut donc déterminer les voies de contamination de chaque agent.

A ce stade, nous possédons donc une sélection d'agents microbiologiques pathogènes pour l'homme (et leurs voies de contamination) susceptibles d'être présents dans les eaux usées ayant subi un traitement tertiaire. Il faut maintenant déterminer si ces pathogènes présentent un risque pour la santé (et dans quelle mesure) dans le cadre de l'aéropersion des espaces verts. Pour cela, il est nécessaire de connaître la Dose Minimale Infectieuse (DMI) du pathogène pour la voie de contamination considérée afin de la comparer à la concentration de l'agent en sortie de traitement tertiaire, et ceci pour chaque agent retenu précédemment. Si la concentration en sortie de traitement est inférieure à la DMI, il n'y a pas, a priori, de risque de contamination.

Il est faut toutefois être prudent car la DMI n'est pas une Valeur Toxicologique de Référence (VTR). La DMI est définie comme la quantité d'agent pathogène qui doit être absorbée par l'homme pour que la maladie se manifeste chez au moins quelques individus. Cela implique qu'elle peut varier d'un individu à l'autre et va aussi dépendre de l'âge, du sexe, de son état physique (déprimé ou non) voire de l'activité professionnelle. Certaines personnes, dites « sensibles », pourront être plus sujettes aux infections. La DMI est donc caractérisée par une grande variabilité interindividuelle.



Néanmoins, dans la présente méthodologie de sélection des agents, le choix d'éliminer un pathogène si celui-ci est en concentration inférieure à la DMI a été fait.

Des facteurs physiques influencent la survie des pathogènes dans l'environnement (cf. partie IV) et doivent être pris en compte dans les scénarii d'exposition. En effet, si un agent pathogène ne survit pas dans l'environnement (dans l'eau, dans le sol...) ou s'il peut y subsister plusieurs jours ou semaines, le risque associé sera différent.

Les concentrations en agents pathogènes en sortie de traitements tertiaires, les voies de contamination des agents, les DMI et les temps de survie dans l'environnement ont permis une sélection des agents microbiologiques pathogènes à retenir pour l'évaluation du risque sanitaire lors de l'aéroaspersion d'espaces verts avec des eaux usées traitées. Il est désormais envisageable de déterminer des scénarii d'exposition à ces agents et de quantifier le risque associé. Des préconisations quant aux modalités d'utilisation de l'aéroaspersion pourront aussi être proposées.

## 2. Discussion

D'un point de vue méthodologique, le procédé de sélection des agents pathogènes étape par étape apparaît efficace et adapté au cadre de l'aéroaspersion d'espaces verts et la recherche des agents présentant un risque sanitaire. Il présente néanmoins deux limites majeures : données manquantes ou difficiles à obtenir et longueur du processus (il faut être le plus exhaustif possible à chaque étape et les agents microbiologiques à considérer sont nombreux).

Nous avons appliqué la méthodologie de sélection des agents. Peu d'agents ont pu être éliminés à chaque étape et à la fin du processus il restait beaucoup trop de microorganismes pathogènes à étudier. En effet, peu de données concernant l'abattement des différents traitements tertiaires et les concentrations des agents en sortie du traitement sont disponibles. Les données fournies sont des ordres de grandeur (du fait de la variabilité des concentrations d'une STEP à l'autre et la variabilité géographique et saisonnière des concentrations en agents infectieux). D'autre part, la dose minimale infectieuse est rarement connue (en plus de la variabilité interindividuelle évoquée plus haut). Les temps de survie dans l'eau et le sol dépendent aussi de nombreux facteurs physiques dont l'ensoleillement qui sera différent d'espace vert à un autre. Enfin, l'aéroaspersion implique trois voies d'exposition potentielles (cf. schéma conceptuel en partie II), ce qui complique le processus d'élimination des pathogènes.

Cette méthode ne nous a donc pas permis d'aboutir à une sélection pertinente d'agents pathogènes à considérer dans le cadre de l'aéroaspersion d'espaces verts par des eaux usées traitées. Elle pourrait néanmoins s'appliquer plus facilement pour un cas précis (STEP donnée avec espaces verts associés donnés) et ne doit pas être abandonnée.

Une autre option est la détermination d'indicateurs de contamination parmi les agents susceptibles d'être présents lors de l'aéroaspersion d'eaux usées traitées. Les indicateurs utilisés à l'heure actuelle (*E. coli*, *Salmonella* et œufs de *Tænia*, cf. tableau 4) peuvent être remis en question (absence d'indicateur d'origine virale, prévalence de *Tænia* dans la population faible...). Des indicateurs d'efficacité de traitement pourraient être plus pertinents dans notre cadre d'étude. Cette question sera abordée en partie VII.

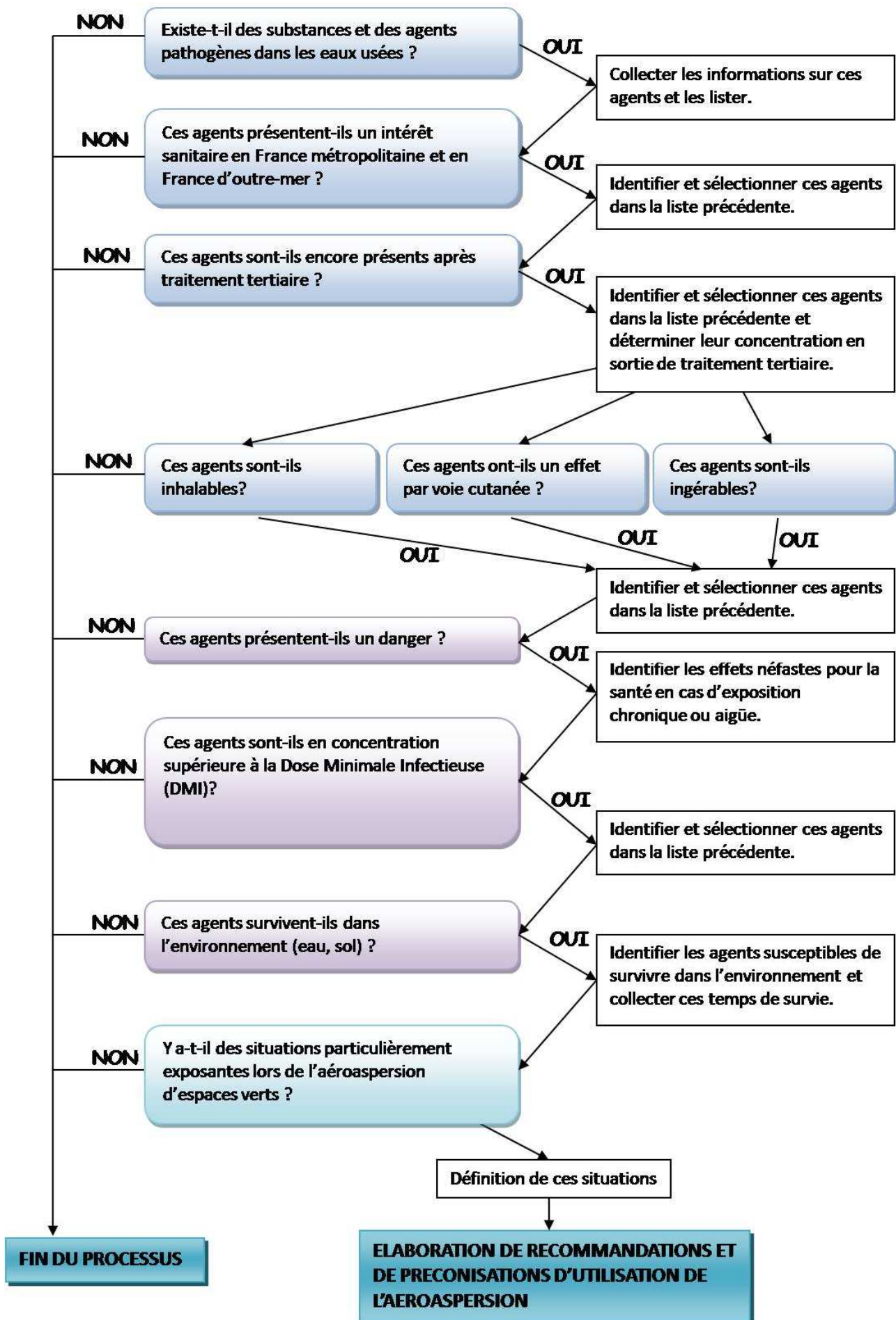


Figure 3 : Méthodologie de sélection des microorganismes pathogènes

### 3. Exemple d'évaluation qualitative du risque sanitaire : *Salmonella*

Une identification détaillée des dangers et une évaluation qualitative du risque pour 15 agents microbiologiques est proposée en annexe 4 : ces agents ne correspondent pas à une liste d'agents sélectionnés dans le cadre de l'étude, la méthodologie proposée en V.1 n'ayant pas abouti. Il s'agit de poursuivre, au travers d'exemples, la réflexion sur l'évaluation des risques sanitaires lors de l'aéroaspersion d'espaces verts.

L'évaluation des risques ne suit volontairement pas les 4 étapes d'une EQRS : le but n'est pas de quantifier le risque, mais de réfléchir à une possible contamination ou non par le pathogène considéré lors de l'aéroaspersion. A partir de données sur la pathogénicité, les modes de transmission, les concentrations dans les effluents bruts, la survie dans l'environnement et la dose infectieuse, il s'agit d'apprécier qualitativement le risque lié à un pathogène.

L'évaluation du risque lié à *Salmonella* est proposée comme exemple ci-dessous.

#### ▪ Caractéristiques, pathogénicité et réservoir

Les bactéries *Salmonella* sont des entérobactéries que l'on retrouve chez l'homme, les mammifères (rongeurs), les oiseaux (volailles) et les animaux à sang froid (reptiles). Elles sont responsables, après pénétration par voie orale, de nombreuses infections (les salmonelloses), notamment des fièvres typhoïde et paratyphoïdes (maladies à déclaration obligatoire n° 1), des gastro-entérites et des toxi-infections alimentaires collectives (maladies à déclaration obligatoire n° 12).

Le principal mode de contamination chez l'homme est l'ingestion à partir de l'eau (*S.typhi* surtout) ou d'aliments contaminés (ex. produits laitiers, œufs, viande).

Les *Salmonella* dites « mineures » (*Salmonella typhi murium*, *enteritidis*, *dublin*, etc...), ubiquitaires, sont ingérées avec une boisson ou un aliment contaminé (cas sporadiques) ou après contamination fécale-orale, souvent par les mains sales (épidémies de collectivités d'enfants). Il peut s'ensuivre des infections purement digestives, les gastro-entérites. Celles-ci se traduisent par de la diarrhée, des vomissements et de la fièvre. Leur évolution est en général bénigne. Certains sujets restent porteurs sains de *Salmonella* dans leur tube digestif et peuvent dans certaines circonstances disséminer leur souche.

Les symptômes associés à la salmonellose (diarrhée, fièvre et crampes abdominales) se déclenchent de 8 h à 72 h après la contamination. La plupart des adultes atteints ressentent ces symptômes durant de quatre à sept jours et se rétablissent ensuite.

Par contre, les symptômes habituels peuvent s'imposer avec nettement plus d'intensité chez les nouveau-nés, les jeunes enfants et les personnes âgées ou chez celles ayant une déficience immunitaire (cancéreux, sidéens) : les *Salmonella* mineures sont susceptibles de franchir la barrière intestinale et de provoquer un syndrome septicémique de type typhoïdique avec hémocultures positives. De plus, dans la fièvre typhoïde (*S. typhi*), la bactérie peut traverser la barrière intestinale, passer dans la circulation sanguine et aller ainsi s'installer dans les reins, le foie, la vessie, le cœur, les articulations, etc. Parfois, l'infection peut être fatale si on n'utilise pas immédiatement des antibiotiques.

*Salmonella* est répandue dans le monde entier, mais de façon plus importante en Amérique du Nord et en Europe (beaucoup de cas sont importés). L'incidence est plus élevée chez les nourrissons et les jeunes enfants. De grandes épidémies peuvent être recensées dans les

hôpitaux, les établissements, les foyers d'accueil, les restaurants. Pour exemple, 2 à 3 millions de cas d'infection surviennent chaque année aux États-Unis, mais la plupart ne sont pas signalés. En 2001, 92 cas de fièvres typhoïdes et paratyphoïdes sont apparus en France. L'incidence était de 0,15 pour 100 000 habitants (elle est inférieure à 1 cas pour 100 000 depuis la fin des années 1980) (Haeghebaert, 2003). En 2002, l'incidence était de 0,20 cas pour 100 000 habitants (Vilagines, 2003).

La dose infectieuse est de 100 à 1000 organismes par ingestion mais elle varie selon de nombreux facteurs et peut atteindre  $10^6$  bactéries.

- Survie dans l'environnement et traitement tertiaire

*Salmonella* se caractérise par une survie importante dans l'environnement. Sa survie peut atteindre jusqu'à deux mois dans les eaux de surface, un mois sur les plantes et près de 70 jours sur le sol.

Le devenir de *Salmonella* dans les aérosols influence aussi sa survie. En effet, lorsque l'atmosphère n'est pas saturée, une évaporation brutale suit la pulvérisation : il y a transformation des gouttelettes en poussières transportées par le vent. Cette déshydratation entraîne une disparition importante de la population bactérienne initiale (les virus et les spores résistent mieux à la dessiccation). D'après une étude du Cemagref sur les aérosols d'eaux résiduelles (1982), seuls 5% des germes totaux survivent après un trajet aérien de quelques dizaines de mètres.

Par ailleurs, *Salmonella* est sensible aux traitements tertiaires. Pour exemple, en 2006, un projet de réutilisation des eaux usées traitées à Narbonne afin de permettre l'arrosage de quatre espaces verts publics sans contraintes de distances de sécurité vis-à-vis des zones de présence humaine a consisté à mettre en œuvre un traitement tertiaire de désinfection poussée en sortie de la station d'épuration de Narbonne. Le traitement tertiaire proposé était une microfiltration suivie d'une désinfection UV et d'une chloration (hypochlorite de sodium). Les essais pilotes ont montré que les performances microbiologiques souhaitées concernant *Salmonella* étaient atteintes : 0 dans 5L.

- Risque associé à *Salmonella*

*Salmonella* peut survivre plusieurs mois dans l'environnement. Néanmoins, en tant que bactérie, elle est sensible à la dessiccation brutale provoquée par l'aérospersion de l'eau usée traitée : sa concentration dans l'environnement est alors fortement diminuée (diminution de 95%). De plus, les traitements tertiaires classiques, comme la désinfection UV, ont un effet bactéricide important sur *Salmonella*.

La dose infectieuse peut être élevée, jusqu'à  $10^6$  bactéries. On retiendra néanmoins une DMI de  $10^3$  bactéries, valeur couramment utilisée à l'heure actuelle. Pour un abattement moyen de 4 unités log (abattement classique pour un traitement du type boues activées associé à un lagunage tertiaire), les quantités ingérées seraient inférieures à la DMI. En effet, les teneurs en salmonelles dans les effluents bruts citées dans la littérature sont comprises entre 0 et  $10^3/100$  ml.

A la vue de ces considérations, il apparaît que le risque associé à *Salmonella* lors de l'aérospersion d'eaux usées traitées est faible. Cela pourrait se traduire par une absence de risque pour les individus sains (il existe des individus sensibles pour lesquels la DMI peut être plus faible et le risque plus grand).

## VI. Réflexion sur une évaluation quantitative des risques sanitaires liés à l'aéropersion d'espaces verts

Pour réaliser une évaluation quantitative des risques sanitaires liés à la réutilisation des eaux usées traitées par aéropersion des espaces verts urbains et des terrains de sports, il faut au préalable identifier les dangers, connaître les relations doses-réponses et évaluer les expositions. Plusieurs scénarios d'exposition peuvent être proposés.

Dans ce rapport, il s'agit de réfléchir à la faisabilité d'une évaluation du risque sanitaire. Le but est de déterminer les paramètres qui interviennent dans la quantification du risque et de voir lesquels peuvent différer d'une situation de réutilisation à une autre, et ceux qui sont difficilement évaluables. En effet, une évaluation quantitative du risque ne semble envisageable que dans un cas particulier, c'est-à-dire pour un espace vert donné (traitement tertiaire associé, technique d'aéropersion donnée, conditions climatiques...).

### 1. Un grand nombre de paramètres à considérer pour évaluer les expositions

Les dangers retenus sont les microorganismes présents dans les eaux usées dont la liste définitive n'a toujours pas pu être établie. Pour établir des scénarios d'expositions et évaluer l'exposition, un grand nombre de paramètres doivent être pris en compte. Le tableau suivant résume l'ensemble des paramètres nécessaires à l'évaluation des expositions.

Paramètre	Description	Commentaires
<b>Eaux usées traitées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentrations en microorganismes en entrée de STEP</li> <li>• Traitement tertiaire appliqué dans la STEP</li> <li>• Concentrations en microorganismes en sortie de STEP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les concentrations en microorganismes peuvent varier au cours de l'année (virus saisonniers par exemple ; conditions météorologiques, notamment la pluviométrie).</li> <li>• Les différents traitements tertiaires appliqués peuvent être différents d'une STEP à une autre et n'abattent pas la contamination microbienne de la même façon.</li> <li>• L'efficacité du traitement peut fluctuer (pannes...).</li> </ul>
<b>Aéroaspergeurs</b>	Des technologies différentes : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Type (buse, gicleur, turbine...)</li> <li>• Angle d'arrosage</li> <li>• Portée du jet</li> <li>• Débit</li> <li>• Pression</li> <li>• Réglage du secteur (de 0° à 360°)</li> <li>• Taille des gouttes aéroaspérgées (ouverture de l'aéroaspergeur)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suivant la technologie, l'aéropersion sera différente d'un espace vert à un autre.</li> <li>• Les réglages de l'aéroaspergeur seront différents d'un terrain à l'autre.</li> <li>• Le moment et le temps d'utilisation de l'aéroaspergeur peuvent aussi varier.</li> <li>• La taille des gouttes est importante : suivant la taille, elles atteindront ou non le poumon profond (à défaut, elles seront expectorées ou mouchées).</li> <li>• Les particules les plus grosses seront soumises à la sédimentation et ne seront donc pas inhalables.</li> </ul>

<b>Budget espace temps</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps passé dans l'espace vert public par les usagers</li> <li>• Espace : usager allongé sur la pelouse, se promenant... plus ou moins près des aéroaspergeurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plusieurs scénarios possibles et à considérer</li> </ul>
<b>Personnes exposées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adultes</li> <li>• Enfants, bébés</li> <li>• Personnes immunodéprimées (cancéreux, sidéens...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plusieurs scénarios possibles et à considérer</li> </ul>
<b>Inhalation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume d'air inhalé par minute</li> <li>• Volume d'eau usée traitée inhalé par minute</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le volume d'air inhalé est différent selon l'âge (bébé, enfants, adultes) : <u>Au repos (0,5 L d'air par respiration):</u> - le nouveau-né : 44 respirations par minute - l'enfant de 5 ans : 26 respirations - l'adolescent : 20 respirations - l'adulte : 16 respirations</li> <li>• Le volume d'air inhalé est différent que l'on soit au repos ou en activité : <u>Pour un adulte, volume d'air inhalé (en L/min):</u> - au repos : 6 - en marchant : 15 - lors d'une promenade à bicyclette : 15 - en marche rapide : 30 - vélo intensif ou en côte : 60 à 100</li> <li>• Le volume d'eau traitée inhalé va dépendre du type d'aéroaspergeur, du débit...</li> </ul>
<b>Paramètre</b>	<b>Description</b>	<b>Commentaires</b>
<b>Ingestion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume d'eau usée traitée ingéré : ingestion accidentelle (ou volontaire pour un enfant)</li> <li>• Quantité de sol arrosé ingérée (enfant atteint du syndrome PICA)</li> </ul>	
<b>Conditions météorologiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vent (dispersion des gouttelettes)</li> <li>• Soleil (rayonnement UV)</li> <li>• Pluie (ruissellement potentiel)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comment prendre en compte ces facteurs ? Certains facteurs influent sur la survie des pathogènes dans l'environnement (cf. partie), d'autres sur leur dispersion dans l'environnement.</li> </ul>
<b>Espace vert</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nature du terrain</li> <li>• Taille du terrain (terrain municipal ou de sport)</li> <li>• Accès de l'espace vert réglementé ou non</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La taille du terrain va influencer le choix de l'arrosage.</li> <li>• Les terrains de sport sont fermés la nuit et l'arrosage peut être réalisé en absence des usagers. A l'inverse, certains jardins municipaux sont tout le temps ouverts au public.</li> </ul>

*Tableau 10 : Paramètres à considérer pour l'évaluation des expositions*

## 2. Faisabilité d'une EQRS

Pour quantifier un risque sanitaire, il faut pouvoir évaluer l'exposition des populations. Ici, le calcul du risque sanitaire apparaît difficile car il y a une grande variabilité des paramètres à considérer d'un espace vert à un autre. La multitude de technologies d'aéropersion disponibles,

par exemple, le prouvent. Il pourrait être intéressant de préconiser un type d'aéroaspersion (fonction de la nature et des caractéristiques de l'espace vert) et un cahier des charges associé. Le but serait de pouvoir estimer les risques de formation d'aérosols et les zones susceptibles d'être contaminées par ceux-ci.

Par ailleurs, certains paramètres nécessaires au calcul du risque ne sont pas ou peu documentés. Les principales données bibliographiques manquantes sont résumées ci-dessous :

- Peu de données sur les agents pathogènes présents dans les eaux usées traitées : dans la littérature, il existe de nombreuses publications sur les indicateurs de contamination fécale (*E. coli*, entérocoques), mais ces données ne peuvent pas être transposées aux agents pathogènes présents dans les eaux usées (il n'existe pas de corrélation entre concentration en indicateurs de contamination fécale et concentration en agents pathogènes) ;
- Peu de travaux sur la propagation et la dispersion des agents microbiologiques par les aérosols : comment prendre en compte l'influence des conditions météorologiques, quel est le comportement des agents pathogènes face à l'aéroaspersion (on peut penser que l'évaporation brutale lors de l'aéroaspersion entraîne une déshydratation des gouttelettes formées pouvant causer une mortalité pour les microorganismes, notamment les bactéries) ? ;
- Peu d'études épidémiologiques relatives à l'impact des aérosols sur l'homme (il existe des études relatives à l'exposition des professionnels des stations d'épuration aux aérosols, mais les eaux usées de STEP sont avant tout brutes et subissent des traitements qui ne sont pas automatiquement tertiaires).

Pour palier à ce manque d'informations, des études pourraient être envisagées pour quantifier au mieux le risque sanitaire lié à l'aéroaspersion d'espaces verts par des eaux usées traitées :

- Détermination des concentrations pour les agents pathogènes sélectionnées en sortie de STEP, en fonction du traitement tertiaire, et de la localisation géographique.
- Réalisation de modèles de dispersion des pathogènes dans l'environnement suite à une aéroaspersion donnée (en prenant en compte la présence ou non de vent)
- Etudes sur la survie des pathogènes dans l'environnement (étude de l'influence des facteurs physiques, notamment l'ensoleillement).
- Réflexion sur les modalités de surveillance avec la mise en place d'indicateurs d'efficacité de traitement (les indicateurs de contamination fécale ne sont pas adaptés dans le cadre de l'aéroaspersion d'eaux usées traitées).

## **VII. Recommandations quant à la réutilisation d'eaux usées pour l'aéroaspersion d'espaces verts urbains**

---

### **1. Recommandations liées à l'aéroaspersion d'eaux usées traitées** (adapté de [20])

La réutilisation des eaux usées est de plus en plus fréquente car une certaine pénurie en eau est observée dans plusieurs régions de la planète. Cette réutilisation des eaux en milieu urbain pour l'irrigation des espaces verts et particulièrement des terrains de golf (exemple de l'Espagne ou du Canada) devient une pratique courante. Comme stipulé dans ce rapport, plusieurs aspects doivent être pris en considération avant d'opter pour un tel usage des eaux usées traitées et les considérations de santé publique doivent prioritairement être évaluées.

Comme vu précédemment, beaucoup de critères vont influencer les teneurs en microorganismes dans les aérosols et le risque sanitaire lié. Néanmoins, en considérant que l'exposition de la population avoisinante et de celle fréquentant le terrain est limitée et qu'il est possible de mettre en place de mesures de contrôle, des recommandations générales concernant l'utilisation d'eaux usées traitées pour l'irrigation d'espaces verts urbains peuvent être formulées pour limiter les risques sanitaires :

- Afin de s'assurer de la conformité des critères microbiens, une fréquence d'échantillonnage permettant de suivre adéquatement l'efficacité de traitement des équipements et la contamination microbiologique de l'eau utilisée pour l'aéroaspersion devra être déterminée. Outre les variations climatologiques, cette fréquence d'échantillonnage devra prendre en compte les variations possibles de l'efficacité du traitement (débits lors de fortes pluies, turbidité).
- Le système de traitement tertiaire choisi (par exemple une désinfection par traitement ultraviolet) devra être surveillé étroitement en incluant une technologie permettant de détecter les anomalies de fonctionnement pour que la qualité microbienne des eaux soit sous les seuils recommandés.
- Les aspects liés à la contamination potentielle d'origine chimique devront aussi être évalués.
- Afin de limiter l'exposition des personnes fréquentant l'espace vert public, des recommandations de « bon sens » devront être appliquées :
  - l'utilisation des aéroasperseurs devra se faire en dehors des heures où le public et les employés sont susceptibles de se trouver dans les zones irriguées s'il s'agit d'un espace public dont l'accès est contrôlé (terrain de golf par exemple) ou de nuit pour les espaces verts dont l'accès n'est pas contrôlé (jardin public)
  - les équipements servant à l'aéroaspersion des eaux usées traitées devront être clairement identifiés afin d'éviter toute utilisation fortuite de ces eaux
  - le personnel attitré à l'utilisation des eaux usées traitées devra être formé et avisé des risques inhérents à l'utilisation de ces eaux
  - par souci de protection de la santé publique, les usagers fréquentant l'espace vert devront être avisés de l'utilisation d'eaux usées traitées pour l'irrigation du terrain afin qu'ils évitent de s'exposer à ces eaux.

Afin de limiter l'exposition de la population près des terrains arrosés :

- du fait de la dispersion possible des agents pathogènes par le vent, une zone tampon sera envisagée pour les sources d'alimentation en eau potable;
- afin de réduire au maximum les risques de contacts avec les eaux giclées, des brise-vents (arbres) en bordure des terrains résidentiels et autres endroits fréquentés pourront être recommandés ;
- les gicleurs ne devront pas être utilisés en période de forts vents.

En respectant l'ensemble de ces recommandations, nous considérons que le risque d'infection microbienne, bien que possible, demeure très faible. Ne pas appliquer ces mesures augmenterait le risque d'exposition à l'eau contaminée et donc l'atteinte à la santé publique.

Enfin, dans un souci de transparence, la municipalité devra prévoir un programme d'information de la population afin de s'assurer de l'acceptabilité sociale liée à l'utilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage des espaces verts urbains.

## 2. Choix d'indicateurs de suivi

Une alternative à la détermination des concentrations en agents pathogènes en sortie des différents traitements tertiaires et du risque sanitaire associé (acceptable ou non suivant les concentrations) peut être envisagée. Il s'agirait de définir un abattement des pathogènes à



atteindre, compte tenu des usages les plus sensibles de l'eau usée traitée. Cela aboutirait à définir les modalités de mise en œuvre (performances du traitement tertiaire des eaux usées nécessaires) et des indicateurs d'efficacité.

A l'heure actuelle, la surveillance des eaux usées traitées destinées à l'arrosage d'espaces verts est basée sur le suivi d'*E. coli*, *Salmonella* et œufs de *Tænia* (cf. tableau 4). Ces indicateurs peuvent être remis en question :

- il n'y a pas de corrélation entre présence d'indicateur de contamination fécale (*E. coli*) et présence d'agents pathogènes ;
- il y a absence d'indicateur d'origine virale ;
- la prévalence de *Tænia* dans la population est faible et par conséquent sa concentration dans les eaux usées aussi.

Les microorganismes indicateurs d'efficacité de traitement devraient idéalement répondre aux caractéristiques suivantes [2]:

- être au moins aussi résistants au traitement que les agents pathogènes dont ils sont les modèles ;
- être présents dans les eaux usées en quantité suffisante (pour pouvoir quantifier l'abattement obtenu) ;
- être en concentration stable (non soumis à des variations importantes telles que des pics épidémiques par exemple).

Une étude sur la pertinence et le choix des microorganismes indicateurs dans le cadre de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'aéroaspersion d'espaces verts et de terrains de sport devrait être menée pour assurer une surveillance en routine et garantir la sécurité des usagers.

## CONCLUSION

---

Au niveau mondial, la réutilisation des eaux usées est en plein essor. Les eaux usées traitées représentent une ressource alternative et les bénéfices environnementaux et économiques sont multiples : protection des ressources naturelles en période de pénuries, préservation de la qualité des milieux... Face aux sécheresses, les eaux usées traitées permettent l'irrigation des cultures et l'arrosage des espaces verts et des terrains de sport. En France, la réutilisation des eaux usées peine à se développer bien que la France soit en tête des pays producteurs de technologies de traitement des eaux. La réglementation actuelle, qui impose des contraintes de distance avec le public, n'est pas adaptée et est à l'origine du retard observé. Pourtant les sécheresses récurrentes dans le centre et le sud de la France ces dernières années montrent l'intérêt de la réutilisation des eaux usées, notamment pour l'irrigation des golfs et des espaces verts.

Les eaux usées contiennent de nombreux microorganismes, dont certains sont pathogènes pour l'homme. Selon le type de microorganismes, la dose infectieuse, c'est-à-dire le nombre d'agents pathogènes nécessaires pour provoquer la maladie, est très variable. Les traitements tertiaires appliqués dans les stations d'épuration permettent un abattement de la contamination microbienne mais le risque zéro n'existe pas. Pour l'aéroaspersion des espaces verts, il est donc essentiel d'évaluer le risque sanitaire lié à cette pratique.

A priori le risque sanitaire microbiologique lié à l'aéroaspersion des eaux usées traitées est limité. En effet, la voie d'exposition principale est l'inhalation des aérosols. Des mesures simples existent pour limiter de façon considérable les contacts entre le public et les aérosols : arrosage en dehors des heures d'ouverture pour les parcs et terrains de sport à accès contrôlé, arrosage la nuit pour les espaces verts ouverts en continu, brise vents pour limiter la propagation des aérosols aux habitations voisines (les aérosols peuvent être transportés à de grandes distances par le vent lors de l'utilisation de gicleurs), arrêt de l'arrosage lors d'épisodes de vents forts...

D'autres paramètres doivent être pris en compte pour évaluer le risque sanitaire. Des facteurs physiques influencent directement la survie des pathogènes et peuvent diminuer leurs concentrations dans l'environnement (par exemple, l'ensoleillement et les températures élevées diminuent les concentrations des microorganismes).

Enfin, les traitements tertiaires actuels, comme la microfiltration couplée à la désinfection UV, permettent d'obtenir des eaux d'une qualité égale ou supérieure à celle des eaux de surface (aujourd'hui, certains traitements tertiaires optimisés permettent même d'obtenir des eaux d'une qualité comparable à celle des eaux destinées à la consommation humaine).

Le respect des conditions d'utilisation de l'aéroaspersion et des traitements tertiaires optimisés et contrôlés diminuent considérablement le risque d'infection microbienne : le risque, bien que possible, est très faible. Néanmoins, une surveillance étroite des systèmes demeure essentielle pour assurer la protection de la santé publique.

Le risque sanitaire lié à l'aéroaspersion est difficilement évaluable d'une façon quantitative. Il faut tout d'abord caractériser les principaux microorganismes retrouvés dans l'eau traitée utilisée. De plus, un projet de réutilisation des eaux usées propose une technique de traitement tertiaire, un arrosage spécifique, des conditions environnementales précises, etc. qui seront différents d'un espace vert à un autre. Il semble plus concevable d'étudier le risque au cas par cas.

Le risque chimique n'a pas été abordé ici mais devra être considéré dans une autre étude pour caractériser en totalité le risque lié à l'aéroaspersion.

## BIBLIOGRAPHIE

---

1. Lazarova, V. and S. Environnement., *Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France*. N° 299 L'eau, l'industrie, les nuisances, 2007: p. 43 à 53.
2. AFSSA, *Réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation*. 2008.
3. CSHPF, *Recommandations sanitaires concernant l'utilisation des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation des cultures et des espaces verts*. 1991: p. 40.
4. WHO, *L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture: recommandations à visées sanitaires*. Série de rapports techniques n° 778, 1989. OMS Genève: p. 82.
5. WHO, *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. 2006. I.
6. AFSSA, *Bilan des connaissances relatives aux virus transmissibles à l'homme par voie orale*. 2007.
7. ORS, *Réutilisation des eaux usées épurées: risques sanitaires et faisabilité en Île de France*. 2003.
8. Asano, *Microbiological investigations of rainwater and graywater collected for toilet flushing*. Water Sci. Technol, 1998. 46 (6-7): 311-6.
9. Faby, J. and F. Brissaud, *L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation*. Office International de l'Eau, 1997: p. 76 pages.
10. IFEN, I.F.d.I.E., *Les services publics de l'assainissement en 2004*. 2008.
11. Goarnisson, *Désinfection par les ultraviolets d'eaux usées urbaines après traitement biologique*. Rapport IGS, 1997.
12. USEPA, *Guidelines for water reuse*. 2004.
13. Sinton, L.W., et al., *Sunlight inactivation of fecal indicator bacteria and bacteriophages from waste stabilization pond effluent in fresh and saline waters*. Appl Environ Microbiol, 2002. 68(3): p. 1122-31.
14. Hurst, C.J., et al., *Survival of enteroviruses in rapid-infiltration basins during the land application of wastewater*. Appl Environ Microbiol, 1980. 40(2): p. 192-200.
15. Bitton, G., O.C. Pancorbo, and S.R. Farrah, *Virus transport and survival after land application of sewage sludge*. Appl Environ Microbiol, 1984. 47(5): p. 905-9.
16. KHAMLICHI, *Studie of some factors that influence survival of fecal pollution indicators and pathogenic bacteria in wastewaters*. Journal européen d'hydrologie. ISSN 1023-6368, ed Association scientifique européenne pour l'eau et la santé, Paris, FRANCE (1994-2003).
17. *Pathogens in wastewater and biosolids*.
18. ALTMAYER N., A.G., SCHMITT S., LEPRINCE A., *Risques microbiologiques et travail dans les stations d'épuration des eaux usées*. Fiche médicotechnique, 1990. INRS n°34.
19. WILD P., A.D., MASSIN N., *Etudes épidémiologiques parmi le personnel des égoutiers de la ville de Paris*. 2004. Rapport d'études: p. 86 p.
20. INSPQ, *Réutilisation d'effluents de stations de traitement d'eaux usées domestiques pour l'irrigation d'un terrain de golf*. 2006.
21. AFSSA, *Fiche de description de danger microbiologique transmissible par les aliments: 1/3 Campylobacter spp*. 2006.
22. INVS, *Les infections à Campylobacter en France: bilan de surveillance du réseau de laboratoires de ville et hospitaliers(2001-2003)*. 2005.

23. AFSSA, *Appréciation des risques alimentaires liés aux campylobacters. Application au couple poulet / Campylobacter jejuni.*
24. Taylor, D.N., et al., *Campylobacter immunity and quantitative excretion rates in Thai children.* J Infect Dis, 1993. 168(3): p. 754-8.
25. Black, R.E., et al., *Experimental Campylobacter jejuni infection in humans.* J Infect Dis, 1988. 157(3): p. 472-9.
26. Butler RC., L.V., Carlson DA., *Susceptibility of Campylobacter jejuni and Yersinia enterocolitica to UV radiation.* Appl Environ Microbiol, 1987. 53: p. 375-378.
27. ASPC, *Escherichia coli entéropathogène.*
28. Groupe scientifique sur l'eau. 2003.
29. INSPQ, *Synthèse sur l'eau potable et la santé humaine.*
30. AFSSET, *Fiche Legionellose.* 2006.
31. INVS, *Investigation de cas groupés de légionellose Courrières (Pas-de-Calais) Août-Septembre 2007.*
32. Office fédéral de la santé publique de Suisse, *Légionelles et légionellose. Particularités biologiques, épidémiologie, aspects cliniques, enquêtes environnementales, prévention et mesures de lutte.*
33. OIE and The center for Food Security and public Health of Iowa State University, *Leptospirosis.* 2005.
34. Santé Canada, *Recommandations au sujet de la qualité des eaux utilisées à des fins récréatives au Canada.* 2009. Troisième édition.
35. INVS, *Leptospirose en France de 2001 à 2003.*
36. ASPC, *Fiche technique santé/sécurité Salmonella.*
37. ASPC, *Fiche technique santé, sécurité Shigella.*
38. STRAUB T.M., P.I.L., GERBA C.P., *Comparision of PCR and cell culture for detection of Enteroviruses in sludge-amended field soils and determination of their transport 215.* Appl. Environ. Microbiol., 1995. 61: p. 2066-2068.

## ANNEXES

---

### Annexe 1 : Les techniques de traitement des eaux usées

Extrait du document « Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France », ORS Ile de France [7].

- Les traitements « classiques »

Une station d'épuration comporte généralement une phase de prétraitement, pendant laquelle les éléments les plus grossiers sont éliminés par dégrillage, puis par flottaison/décantation (pour les sables et les graisses). Vient ensuite un traitement dit primaire, correspondant à une décantation plus longue, pour éliminer une partie des matières en suspension. Des traitements secondaires, physico-chimiques (sels de fer ou d'aluminium) et/ou biologiques (boues activées, lits bactériens), sont ensuite appliqués, afin d'éliminer la matière organique. Ils sont généralement suivis d'une phase de clarification qui est une décantation. Enfin, un traitement des nitrates et des phosphates est exigé en fonction de la sensibilité du milieu récepteur. Il existe également des traitements dits extensifs, comme le lagunage, qui combinent des traitements biologiques, physiques et naturels.

- Les traitements extensifs : le lagunage secondaire

Le lagunage secondaire utilise des mécanismes naturels pour traiter les eaux usées : bactéries, photosynthèse et pouvoir germicide de la lumière et de certaines algues. Un traitement par lagunage comprend en général trois types de bassins : un bassin anaérobie, un bassin facultatif et un bassin de maturation. Le bassin anaérobie permet de diminuer la charge en matière organique. L'anaérobiose est obtenue en apportant un effluent très chargé en matière organique. Le bassin facultatif permet le développement d'algues photosynthétiques qui vont produire de l'oxygène, tout en diminuant la charge en matière organique. Enfin, le bassin de maturation va permettre l'élimination des agents pathogènes, sous l'action conjuguée des UV et du pouvoir germicide de certaines algues.

- Les procédés de désinfections supplémentaires

- **Les traitements chimiques et les ultraviolets**

Le **chlore** est un oxydant puissant qui réagit à la fois avec des molécules réduites et organiques, et avec les micro-organismes. Les traitements de purification et de clarification en amont ont une très grande importance pour permettre une bonne efficacité du traitement, éviter d'avoir à utiliser trop de chlore et éviter la formation de sous-produits toxiques.

L'**ozone** est un traitement chimique par oxydation. L'utilisation de réactifs chimiques oxydants pour le traitement des eaux usées a visé au départ la stérilisation de l'eau et la destruction des germes pathogènes. L'ozone a l'avantage de permettre des actions complémentaires dans la destruction d'un grand nombre de micropolluants chimiques et dans l'amélioration des goûts, des odeurs et dans la destruction des couleurs.

Le traitement par **rayons ultraviolets** (254 nm) utilise des lampes à mercure disposées parallèlement ou perpendiculairement au flux d'eau. Leur rayonnement s'attaque directement aux microorganismes. Ce traitement est très simple à mettre en œuvre, car il n'y a ni stockage, ni

manipulation de substances chimiques. La durée d'exposition nécessaire est très courte (20 à 30 secondes). L'efficacité du traitement dépend essentiellement de deux paramètres :

- les lampes, qui doivent être remplacées régulièrement et qui doivent être nettoyées car elles ont tendance à s'encrasser ;
- la qualité de l'effluent : les matières en suspension et certaines molécules dissoutes absorbent les UV, ce qui diminue l'efficacité des lampes.

Le traitement aux rayons UV est plus économique et pose moins de problèmes de toxicité que le chlore.

### ➤ **Les membranes**

Les membranes (**microfiltration, ultrafiltration**) permettent de filtrer et d'éliminer toutes les matières en suspension, tous les micro-organismes et toutes les substances qui s'y adsorbent. Seules subsistent les matières dissoutes. L'efficacité épuratrice d'une membrane dépend de son «seuil de coupure».

Les autres avantages d'un traitement par membranes sont une réduction considérable de la surface nécessaire pour le site de traitement (moins 50 % de surface totale au sol et moins 40 % du volume d'un bassin biologique) et une automatisation poussée de l'usine.

Un inconvénient majeur est l'entretien des membranes : elles nécessitent d'être nettoyées régulièrement pour continuer à être efficaces. De plus, le traitement par membranes est un procédé dont le coût est élevé.

L'**osmose inverse** est une technique de filtration encore plus fine, qui permet de séparer aussi les substances dissoutes.

### ➤ **Le lagunage tertiaire**

Le lagunage tertiaire est un procédé extensif de désinfection similaire au lagunage secondaire, si ce n'est qu'il est précédé d'un traitement d'épuration comme par exemple un traitement par boues activées. Il permet d'éliminer les micro-organismes, d'affiner l'épuration, de faire face aux variations de flux et de protéger le milieu récepteur.

## **Annexe 2 : Classement des agents biologiques fixé par l'article R 4421-3 du Code du travail relatif à la protection des travailleurs**

### **Article R4421-3**

Créé par Décret n°2008-244 du 7 mars 2008 - art. (V)

Les agents biologiques sont classés en quatre groupes en fonction de l'importance du risque d'infection qu'ils présentent :

**1°** Le groupe 1 comprend les agents biologiques non susceptibles de provoquer une maladie chez l'homme ;

**2°** Le groupe 2 comprend les agents biologiques pouvant provoquer une maladie chez l'homme et constituer un danger pour les travailleurs. Leur propagation dans la collectivité est peu probable et il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficaces ;

**3°** Le groupe 3 comprend les agents biologiques pouvant provoquer une maladie grave chez l'homme et constituer un danger sérieux pour les travailleurs. Leur propagation dans la collectivité est possible, mais il existe généralement une prophylaxie ou un traitement efficaces ;

**4°** Le groupe 4 comprend les agents biologiques qui provoquent des maladies graves chez l'homme et constituent un danger sérieux pour les travailleurs. Le risque de leur propagation dans la collectivité est élevé. Il n'existe généralement ni prophylaxie ni traitement efficace.

## Annexe 3 : Liste des agents pathogènes présents dans les eaux usées, appartenant aux groupes 2, 3 ou 4 de l'article R4421-3 ou étant soumis à déclaration

Virus pathogènes pour l'homme		Pathologie, symptômes	Voies de transmission	Répartition du pathogène d'intérêt sanitaire/Epidémiologie	Source bibliographique
Genre	Espèce				
Adénovirus		Fièvre, rhinite, pharyngite, amygdalite, toux et conjonctivite	Contact oral ou par exposition à des gouttelettes	Répandu dans le monde entier.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds3f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds3f-fra.php</a>
Coronavirus	Coronavirus humains	Affection respiratoire (rhume)	Inhalation d'aérosols, transmission respiratoire d'une personne à une autre ; indirectement, par contact avec des objets hébergeant des agents pathogènes.	Répandu dans le monde entier, principale cause d'affections respiratoires de la fin de l'automne et du début de l'hiver, à l'origine de 10-30% des rhumes.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds83f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds83f-fra.php</a> - 2001
Entérovirus	Poliovirus	Paralyse, méningite, fièvre, poliomyélite	Voie fécale-orale, eau, aliments	Eradiquée de l'ensemble du continent américain, de la région du Pacifique occidental et de la région européenne de l'OMS.	<a href="http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/polio_ater_aigue/epidemiologie.pdf">http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/polio_ater_aigue/epidemiologie.pdf</a> - 2008
	Virus coxsackie A	Méningite, infection respiratoire, herpangine	Contact direct avec des sécrétions nasopharyngiennes d'une personne infectée, voie fécale-orale, inhalation d'aérosols infectés	Répandu dans le monde entier. Enfants de moins de 10 ans particulièrement vulnérables (épidémies dans garderies)	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds44f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds44f-fra.php</a> - 2000
	Virus coxsackie B	Myocardite, éruption cutanée, méningite, fièvre, diarrhée			
	Echovirus	Méningite, infection respiratoire, éruption cutanée, fièvre, diarrhée	Voie fécale-orale	Répandu dans le monde entier. Epidémies fréquentes dans les garderies.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds56f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds56f-fra.php</a> - 2001
Hépatovirus	Virus de l'hépatite A	Hépatite infectieuse	De personne à personne par voie oro-fécale, par ingestion d'eau ou d'aliments contaminés.	Répandu dans le monde entier, 20 à 25% des hépatites cliniquement apparentes dans le monde entier.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds75f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds75f-fra.php</a> - 2001
	Virus de l'hépatite E	Ictère, anorexie, hépatomégalie, abdominales, des nausées, vomissements et fièvre. Le virus de l'hépatite E est le plus dangereux durant la grossesse	Voie fécale-orale, ingestion d'eau contaminée	Régions géographiques étendues, notamment là où l'hygiène fait défaut	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds79f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds79f-fra.php</a>
Mastadénovirus	Adénovirus humains	Infection respiratoire, conjonctivite, gastro-entérite	Directement, par contact oral ou des expositions (inhalation) à des gouttelettes ; indirectement, par contact avec des objets fraîchement souillés par des expectorations d'une personne infectieuse. Transmission possible par voie oro-fécale.	Répandu dans le monde entier.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds3f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds3f-fra.php</a> - 1999
Norovirus	Caliciviridae	Gastro-entérites aiguës	voie oro-fécale, de personne à personne, par ingestion d'eau ou d'aliments contaminés, transmission par voie aérienne (aérosols).	Dans toutes les régions du globe	Fiche AFSSA <a href="http://www.infectiologie.com/site/medias/_documents/officiels/afssa/Norovirus090207.pdf">http://www.infectiologie.com/site/medias/_documents/officiels/afssa/Norovirus090207.pdf</a>
Parvovirus	Parvovirus humains (B19)	Crise érythroblastopénique	Contact avec des sécrétions infectées des voies respiratoires, transmission mère-enfant.	Répandu dans le monde entier. Poussées épidémiques principalement chez les enfants d'âge pré-scolaire.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds116f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds116f-fra.php</a> - 2001
Réovirus	Réovirus humains	Non établie			
Rotavirus	Rotavirus humains	Gastro-entérite	De personne à personne par voie oro-fécale ; par contact avec des sécrétions respiratoires, de l'eau, des aliments ou des surfaces contaminées ; par contact avec des objets hébergeant l'agent.	Répandu dans le monde entier. Principale cause de gastro-entérite chez l'enfant (95% des enfants dans le monde sont infectés).	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds86f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds86f-fra.php</a> - 2001
Influenzaevirus	Virus grippal	Infections respiratoires	Par l'intermédiaire de gouttelettes provenant des voies aériennes supérieures générées par la toux, les éternuements ou la parole d'un sujet infecté. Possibles par contact des muqueuses avec des mains ou des objets fraîchement souillés par les sécrétions oropharyngées d'un sujet infecté. Transmission par aérosols évoquée mais discutée.	Virus de répartition mondiale évoluant selon un mode épidémique voire pandémique.	<a href="http://www.inrs.fr/eficatt.nsf/(allDocParRef)/FCGRIPPE?OpenDocument">http://www.inrs.fr/eficatt.nsf/(allDocParRef)/FCGRIPPE?OpenDocument</a> - 2006



Bactéries pathogènes pour l'homme		Pathologie, symptômes	Voies de transmission	Répartition du pathogène d'intérêt sanitaire/Epidémiologie	Source bibliographique
Genre	Espèce				
Aeromonas	A.hydrophila	gastro-entérite, septicémie, infections oculaires et des voies respiratoires, pneumonie et infections des voies urinaires	Voie fécale-orale; contact avec l'eau, les aliments, le sol ou les matières fécales contaminées	Répandu dans le monde entier et particulièrement à proximité des sources d'eau douce	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds6f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds6f-fra.php</a>
Actinomyces	A.israeli	Actinomycosis	Transmission de personne à personne par contact buccal, inhalation d'aérosols ou vecteurs passifs	Répandu dans le monde entier (saprophytes habituels de la cavité buccale)	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds2f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds2f-fra.php</a> - 1999
Bacillus	B.anthraxis	Charbon bactérien	Air (inhalation de spores), aliments	Rare et sporadique dans les pays industrialisés	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds29f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds29f-fra.php</a> - 1999
Campylobacter	C.spp	Campylobactérioses (diarrhées)	Ingestion d'aliment et d'eau, contact avec des animaux domestiques infectés	Importante cause d'infections diarrhéiques dans le monde	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds29f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds29f-fra.php</a> - 1999
Clostridium	C.perfringens	Entérotoxémies, gangrènes...	Ingestion d'aliments contaminés par le sol ou des matières fécales	Très répandu et relativement fréquent dans les pays où les méthodes de cuisson favorisent la multiplication des clostridies	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds37f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds37f-fra.php</a> - 1999
	C.botulinum	Botulisme	Ingestion d'aliments contaminés par la toxine	Cas sporadiques survenant dans le monde entier	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds35f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds35f-fra.php</a> - 1999
	C.tetani	Tétanos	Contact cutané-muqueux (spores tétaniques pénètrent par une plaie)	Répandu dans le monde entier	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds38f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds38f-fra.php</a> - 2000
Enterobacter	E. spp	Infections diverses (voies urinaires, poumons, plaies, sang)	Transmission par voie oro-fécale. Contact des muqueuses avec des fournitures médicales contaminées.	Répandu dans le monde entier, souvent lié à des infections hospitalières.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds59f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds59f-fra.php</a> - 2001
Escherichia	E.coli	Gastro-entérites, septicémies, infections des voies urinaires et de la vésicule biliaire	Ingestion d'aliments contaminés, transmission par la voie oro-fécale	Cas sporadiques d'épidémies de diarrhées sanguinolentes dues à E. coli O157 : H7	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds63f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds63f-fra.php</a> - 2001
Klebsiella	K.pneumoniae	Pneumonie	Sol, eau, aliments	Répandu dans le monde entier, les 2/3 des infections étant acquises en milieu hospitalier	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds90f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds90f-fra.php</a> - 2001
Legionella	L.pneumophila	Légionellose	Transmission par les aérosols	Maladie observée en Amérique du Nord, en Afrique, en Australie et en Europe. Cas sporadiques.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds93f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds93f-fra.php</a> - 2001
Leptospira	L.interrogans	Leptospirose	Contact de la peau ou des muqueuses avec eau, sol, végétation contaminée. Contact direct avec l'urine ou les tissus d'animaux contaminés. Ingestion d'aliments contaminés ou inhalation de gouttelettes de liquides contaminés	Répandu dans le monde entier	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds95f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds95f-fra.php</a> - 2001
Listeria	L.monocytogenes	Listériose	Transmission materno-foetale, contact direct avec du matériel infectieux ou du sol contaminé par des matières fécales, ingestion d'aliments contaminés	Infection rarement diagnostiquée, habituellement sporadique	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds96f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds96f-fra.php</a> - 2001
Mycobacterium	M.tuberculosis	Tuberculose	Inhalation de particules en suspension dans l'air	Répandu dans le monde entier	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds103f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds103f-fra.php</a> - 2001
Pseudomonas	P.aeruginosa	Surinfections, suppurations, infections urinaires	Contact direct avec de l'eau, des aérosols ou des inhalations	Répandu dans le monde entier, infection nosocomiale	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds123f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds123f-fra.php</a> - 2001
Salmonella	S.spp	Salmonellose	Ingestion d'aliments contaminés, transmission fécale-orale d'une personne à une autre	Répandu dans le monde entier	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds135f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds135f-fra.php</a> - 2001
Shigella	S.spp	Dysenterie bacillaire	Eau, aliments, transmission directe ou indirecte par voie oro-fécale	Répandu dans le monde entier	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds139f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds139f-fra.php</a> - 2001
Staphylococcus	S.aureus	Infections staphylococciques (grande variété des manifestations cliniques)	Transmission de personne à personne par contact, ingestion d'aliments	Répandu dans le monde entier (pathogène opportuniste de la flore normale)	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds143f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds143f-fra.php</a> - 2001
Streptococcus	S.pneumoniae	Pneumonie pneumococcique	Transmission par propagation de gouttelettes, par contact oral direct, transmission de personne à personne	Epidémie continue, particulièrement chez les nourrissons, les vieillards et les alcooliques	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds147f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds147f-fra.php</a> - 2001
Vibrio	V.cholerae	Choléra	Ingestion d'eau ou d'aliments contaminés par les fèces des malades	Rare, pas d'épidémie récente	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds164f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds164f-fra.php</a> - 2001
Yersinia	Y.entérocolitica	Entérocolite, septicémie	Transmission fécale-orale, eau, aliments	Répandu dans le monde entier. 2/3 des infections surviennent chez les nourrissons et les jeunes enfants	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds168f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds168f-fra.php</a> - 2001

Parasites pathogènes pour l'homme		Pathologie, symptômes	Voies de transmission	Répartition du pathogène d'intérêt sanitaire/Epidémiologie	Source bibliographique
Genre	Espèce				
<b>Sous règne : PROTOZOAIRE</b>					
Balantidium	B. coli	Balantidiose	Contamination fécale-orale, la contamination fécale de l'eau étant un mécanisme de transmission important	Répandu dans le monde entier. Epidémies attribuables à une contamination hydrique fréquente dans les régions où les conditions sanitaires sont très défavorables et où une contamination fécale est importante.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds15f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds15f-fra.php</a> - 1999
Cryptosporidium	C.parvum	Cryptosporidiose	voie fécale-orale, par ingestion d'eau ou de nourriture contaminée	Répandu dans le monde entier	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds48f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds48f-fra.php</a>
Entamoeba	E. histolytica	Amibiase : diarrhée, abcès intestinaux	Ingestion d'eau et d'aliments (légumes crus) souillés par des matières fécales	Répandu dans le monde entier (10% de la population mondiale infectée). Taux d'infection plus élevés dans les régions tropicales où les conditions sanitaires font défaut.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds58f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds58f-fra.php</a> - 2001
Giardia	G. lamblia	Dysenteries	Le principal mode de transmission est la voie orofécale.	Répandu dans le monde entier en particulier dans les régions où les conditions sanitaires sont déficientes.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds71f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds71f-fra.php</a> - 2001
Toxoplasma	T. gondii	Toxoplasmose	Consommation de viande infectée mal cuite ; ingestion de lait, d'aliments ou d'eau contenant des oocystes	Répandu dans le monde entier. L'incidence est plus élevée dans les régions tropicales et plus faible dans les régions froides et arides.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds153f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds153f-fra.php</a> - 2001
<b>Sous règne : METAZOAIRE</b>					
Ascaris	A.lumbricoïdes	Ascariose	Ingestion de sol ou d'aliments crus contaminés par des fèces renfermant des oeufs contaminés.	Répandu dans le monde entier. Prédomine dans les régions tropicales humides.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds9f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds9f-fra.php</a> - 1999
Ancylostoma	A.duodenale	Ankylostomose	Contamination par voie orale ou percutanée.	Répandu dans le monde entier. Largement endémique dans les régions tropicales et subtropicales où les mesures d'hygiène sont déficientes.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds7f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds7f-fra.php</a> - 1999
Trichuris	T. trichuria	Trichocéphalose ou trichurose	Ingestion de terre ou d'aliments contenant des oeufs infectieux.	Répandu dans le monde entier, principalement dans les régions chaudes et humides.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds157f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds157f-fra.php</a> - 2001
Toxocara	T. cani	Toxocarose	Transfert à la bouche, direct ou indirect, d'oeufs provenant de sols contaminés, par l'ingestion de légumes crus non lavés et de terre.	Répandu dans le monde entier. Les infections à T. canis sont beaucoup plus fréquentes.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds152f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds152f-fra.php</a> - 2001
Echinococcus	E. spp	Echinococcose	Transfert de la main à la bouche d'oeufs de cestode provenant de déjections de chien ; ingestion d'eau et d'aliment souillés par des déjections d'animaux infectés.	Plus commun dans les régions tempérées où l'on élève des moutons. Espèce très commune.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds54f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds54f-fra.php</a> - 2001
Fasciola	F. hepatica	Fasciolose	Ingestion de plantes aquatiques crues (cresson) sur lesquelles se sont fixés des métacercaires, eau contaminée, ingestion de bétail ou de foie de mouton contenant des parasites.	Répandu dans le monde entier.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds67f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds67f-fra.php</a> - 2001
Schistosoma	S.mansoni	Bilharziose, schistosomiase, dermatite des nageurs	Principalement par contact avec de l'eau contaminée; des larves nageantes infectantes (cercaires) pénètrent directement dans la peau	Afrique, dans la Péninsule arabe, au Brésil, au Surinam et au Venezuela, ainsi que dans certaines îles des Antilles	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds136f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds136f-fra.php</a>
Taenia	T. saginata	Taeniasis/Cysticercose	Ingestion de viande de boeuf crue ou mal cuite.	Répandu dans le monde entier. Fréquent dans les pays où l'on consomme de la viande de boeuf mal cuite.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds150f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds150f-fra.php</a> - 2001
	T. solium		Ingestion de viande de porc crue ou mal cuite. (contamination oro-fécale directe ou indirecte pour la transmission de la cysticercose).	Répandu dans le monde entier. Fréquent dans les pays où l'on consomme de la viande de porc mal cuite.	l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds151f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds151f-fra.php</a> - 2001

Champignons et levures pathogènes pour l'homme		Pathologie, symptômes	Voies de transmission	Répartition du pathogène d'intérêt sanitaire/Epidémiologie	Source bibliographique
Genre	Espèce				
Levures	Candida albicans	Candidose (infections digestives, cutanéomuqueuses)	Propagation endogène (fait partie de la flore normale de l'humain) ; par contact avec les sécrétions de la bouche et de la peau et les selles des malades ou des porteurs sains.	Répandu dans le monde entier.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds30f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds30f-fra.php</a> - 1999
	Cryptococcus neoformans	Cryptococcose (manifestations pulmonaires, cutanées)	Inhalation de spores	Cas apparaissant dans toutes les parties du monde.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds47f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds47f-fra.php</a> - 1999
Champignons	Aspergillus spp	Aspergillose (infection des voies respiratoires supérieures, mycoses profondes)	Inhalation de conidies en suspension dans l'air.	Répandu dans le monde entier. Infection peu fréquente (maladie principalement nosocomiale)	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds11f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds11f-fra.php</a> - 1999
	Epidermophyton floccosum	Dermatophytose (mycoses superficielles)	Par contact direct ou indirect avec des lésions du cuir chevelu de personnes ou d'animaux infectés ou par contact avec des vecteurs passifs (plancher, vêtements...) contaminés par de l'épithélium desquamé.	Répandu dans le monde entier. Relativement fréquent, en particulier sous les climats chauds et humides.	Fiche technique santé/sécurité de l'agence de santé publique du Canada <a href="http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds61f-fra.php">http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds61f-fra.php</a> - 1999
	Trichophyton spp				

**Tableau 11 : Agents pathogènes présents dans les eaux usées, appartenant aux groupes 2, 3 ou 4 de l'article R4421-3 ou étant soumis à déclaration**

## Annexe 4 : Identification des dangers et réflexion sur le risque sanitaire lié

Une identification des dangers pour 15 microorganismes et une discussion sur le risque sanitaire associé à chaque pathogène sont proposées ci-après. Le processus de sélection des agents élaboré dans ce rapport n'ayant abouti, des pathogènes ont été choisis pour l'étude. La pertinence du choix de ces agents peut être approuvée mais n'est en aucun cas démontrée.

Bactéries pathogènes pour l'homme		Pathologie, symptômes	Voies de transmission	Répartition du pathogène d'intérêt sanitaire/Epidémiologie	
Genre	Espèce				
<i>Campylobacter</i>	<i>C.spp</i>	Campylobactérioses (diarrhées)	Ingestion d'aliment et d'eau, contact avec des animaux domestiques infectés	INGESTION	Importante cause d'infections diarrhéiques dans le monde
<i>Escherichia</i>	<i>E.coli</i>	Gastro-entérites, septicémies, infections des voies urinaires et de la vésicule biliaire	Ingestion d'aliments contaminés, transmission par la voie oro-fécale	INGESTION	Cas sporadiques d'épidémies de diarrhées sanguinolentes dues à <i>E. coli</i> O157 : H7
<i>Legionella</i>	<i>L.pneumophila</i>	Légionellose	Transmission par les aérosols	INHALATION	Maladie observée en Amérique du Nord, en Afrique, en Australie et en Europe. Cas sporadiques.
<i>Leptospira</i>	<i>L.interrogans</i>	Leptospirose	Contact de la peau ou des muqueuses avec eau, sol, végétation contaminée. Contact direct avec l'urine ou les tissus d'animaux contaminés. <i>Ingestion d'aliments contaminés ou inhalation de gouttelettes de liquides contaminés</i>	CUTANEE	Répandu dans le monde entier
<i>Salmonella</i>	<i>S.spp</i>	Salmonellose	Ingestion d'aliments contaminés, transmission fécale-orale d'une personne à une autre	INGESTION	Répandu dans le monde entier
<i>Shigella</i>	<i>S.spp</i>	Dysenterie bacillaire	Eau, aliments, transmission directe ou indirecte par voie oro-fécale	INGESTION	Répandu dans le monde entier
<i>Vibrio</i>	<i>V.cholerae</i>	Choléra	Ingestion d'eau ou d'aliments contaminés par les fèces des malades	INGESTION	Rare, pas d'épidémie récente
Virus pathogènes pour l'homme		Pathologie, symptômes	Voies de transmission	Répartition du pathogène d'intérêt sanitaire/Epidémiologie	
Genre	Espèce				
Entérovirus	Virus coxsackie A	Méningite, infection respiratoire, herpangine	Contact direct avec des sécrétions nasopharyngiennes d'une personne infectée, voie fécale-orale, inhalation d'aérosols infectés	INHALATION	Répandu dans le monde entier. Enfants de moins de 10 ans particulièrement vulnérables (épidémies dans garderies)
	Virus coxsackie B	Myocardite, éruption cutanée, méningite, fièvre, diarrhée		INHALATION	
	Echovirus	Méningite, infection respiratoire, éruption cutanée, fièvre, diarrhée	Voie fécale-orale	INHALATION	
Hépatovirus	Virus de l'hépatite A	Hépatite infectieuse	De personne à personne par voie orofécale, par ingestion d'eau ou d'aliments contaminés.	INGESTION	Répandu dans le monde entier, 20 à 25% des hépatites cliniquement apparentes dans le monde entier.
Rotavirus	Rotavirus humains	Gastro-entérite	De personne à personne par voie orofécale; par contact avec des sécrétions respiratoires, de l'eau, des aliments ou des surfaces	INGESTION	Répandu dans le monde entier. Principale cause de gastro-entérite chez l'enfant (95% des enfants dans le monde sont infectés).

Parasites pathogènes pour l'homme		Pathologie, symptômes	Voies de transmission	Répartition du pathogène d'intérêt sanitaire/Epidémiologie	
Genre	Espèce				
<b>Sous règne : PROTOZOAIRE</b>					
<i>Cryptosporidium</i>	<i>C. parvum</i>	Cryptosporidiose	Voie fécale-orale, par ingestion d'eau ou de nourriture contaminée	INHALATION	Répandu dans le monde entier
<i>Giardia</i>	<i>G. lamblia</i>	Dysentries	Le principal mode de transmission est la voie oro-fécale.	INGESTION	Répandu dans le monde entier en particulier dans les régions où les conditions sanitaires sont déficientes.
<i>Naegleria</i>	<i>N. floweri</i>	Naegleriase, méningo-encéphalite amibienne primitive	Voie nasale	INHALATION	Espèce essentiellement tropicale, ubiquiste, vivant dans les eaux douces et chaudes
<b>Sous règne : METAZOAIRE</b>					
<i>Ascaris</i>	<i>A. lumbricoïdes</i>	Ascariose	Ingestion de sol ou d'aliments crus contaminés par des fèces renfermant des oeufs contaminés.	INGESTION	Répandu dans le monde entier. Prédomine dans les régions tropicales humides.

**Tableau 12 : Pathogénicité, transmission et épidémiologie de quelques agents pathogènes**

(Les données du tableau ci-dessus sont issues des fiches techniques santé-sécurité de l'Agence de Santé Publique du Canada)

## A. *Campylobacter* spp.

### ▪ Caractéristiques et survie dans l'environnement

Plusieurs espèces ou sous-espèces appartiennent au genre *Campylobacter* dont certaines sont regroupées sous l'appellation de *Campylobacter* thermotolérants (*C. jejuni*, *C. coli*, *C. lari*). Elles sont à l'origine de la grande majorité des cas de campylobactérioses humaines d'origine alimentaire. D'autres espèces ou sous-espèces (*C. upsaliensis*, *C. fetus* et *C. jejuni* subsp. *doylei*) peuvent également être à l'origine de campylobactérioses humaines (AFSSA, 2006 [21]).

Le dernier rapport de surveillance de l'InVS pour la période 2001-2003 impute 76% des cas recensés à *C. jejuni*, 17% à *C. coli* et 5% à *C. fetus* [22].

Les espèces du genre *Campylobacter* sont des bacilles à gram négatif mobiles grâce à un flagelle polaire, adaptés à la vie dans le mucus du tractus digestif de l'homme et des animaux et résistants aux sels biliaires (acidité).

Leur croissance est favorisée dans une atmosphère appauvrie en oxygène (anaérobie préférentielle) et, pour les espèces thermotolérantes, à une température optimale de 42 °C. Les principales caractéristiques relatives aux conditions de croissance de ces bactéries sont récapitulées dans le tableau suivant [21].

	Optimum de croissance	Inhibition de croissance
Température	40 – 42 °C	< 30 °C – > 45 °C
pH	6,5 – 7,5	< 4,9 – > 9,0
O <sub>2</sub>	3 – 5 %	0 – 15 à 19 %
CO <sub>2</sub>	10 %	-
a <sub>w</sub>	0,997	< 0,987
NaCl	0,5 %	> 2 %

**Tableau 13 : Conditions de croissance de *Campylobacter* spp.**

Les bactéries *Campylobacter* sont souvent retrouvées dans des eaux de surface et de ruissellement (AFSSA, [23]). Les **temps de survie** mesurés dans de l'eau de rivière sont de 6 à plus de 60 jours, en fonction des souches. La survie est significativement plus importante à basse température (4°C-10°C) qu'à température ambiante et est diminuée par une aération-oxygénation des eaux.

L'application de **rayons UV** mimant une exposition solaire d'une journée montre que les populations deviennent non cultivables après 30 à 90 minutes dans des eaux de surface : attention, cette publication souligne également la problématique du concept de viable mais non cultivable (VNC), pour certaines formes de *Campylobacter* dans les eaux, hypothétiquement revivifiables chez les animaux ou l'homme.

Pour les pH inférieurs ou égaux à 4 et supérieurs ou égaux à 9, l'effet bactéricide est important. Les bactéries *Campylobacter* sont plus sensibles aux acides organiques qu'aux acides minéraux.

- Réservoirs, transmissions, pathogénicité et épidémiologie

Le **réservoir** principal de *Campylobacter spp* est le tube digestif des oiseaux mais aussi de nombreuses autres espèces d'animaux sauvages ou domestiques. Souvent présents de manière asymptomatique chez les animaux, les déjections peuvent contaminer les eaux des lacs et rivières qui représentent donc un second réservoir non négligeable (cf. conditions de survie dans les eaux ci-dessus).

La **transmission** à l'homme peut être directe par contact avec l'animal ou la carcasse infectée. Elle peut être indirecte par **voie oro-fécale** soit par l'ingestion d'aliments contaminés tels que l'eau de boisson, le lait cru, la viande de volaille insuffisamment cuite, etc. (80% des cas de campylobactérioses seraient d'origine alimentaire) (FAO/WHO, 2002), soit de personne à personne.

L'AFSSA [21, 23] souligne que la transmission principale se fait par ingestion d'aliments contaminés (cas sporadiques) mais que **l'eau de distribution contaminée** est considérée comme l'une des principales sources des cas groupés de campylobactérioses (lors des grands pics épidémiques).

Le pouvoir pathogène, notamment de *C. jejuni*, est important. Il provoque des affections diarrhéiques (dites campylobactérioses) chez l'être humain et l'on considère en général qu'il s'agit de la **source bactérienne de gastro-entérite la plus courante dans le monde**.

Le temps d'incubation est de 1-10 jours pour une durée 3-4 jours.

Les **personnes les plus sensibles** (sujettes à des complications) sont les **enfants** de moins de 5 ans qui présentent également les incidences les plus fortes, les **personnes âgées** et les **immunodéprimés**. Dans une étude thaïlandaise, il a été mis en évidence que les excréments d'enfants de moins de 5 ans atteints de campylobactériose pouvaient varier de 1 à 8 log CFU/g de selles (valeur médiane = 6 log) [24]. Les bébés de moins de 6 mois sont encore protégés par les anticorps IgG maternels contrairement aux « jeunes séro-convertis » plus fragiles que les personnes âgées de plus de 5 ans.

Les complications comme les bactériémies et les septicémies apparaissent peu fréquemment (moins de 1% des cas). Par contre, *C. jejuni* peut être à l'origine d'un syndrome post-infectieux de type arthritique, d'inflammation hépatique ou rénal, et surtout du syndrome de Guillain-Barré qui se manifeste par une paralysie temporaire du système nerveux périphérique ; ce syndrome est réputé comme très sévère, avec une mortalité pouvant atteindre 2 à 3 % des cas, et des séquelles neurologiques majeures ; on estime que 20 à 30 % des cas de syndrome de Guillain-Barré, les plus sévères, seraient dus à une infection par *Campylobacter jejuni*. De plus, on peut considérer qu'un cas sur mille d'infection humaine par *Campylobacter spp.* provoque le syndrome de Guillain-Barré.

Enfin, le rapport de surveillance de l'INVS sur la période 2001-2003 en France a recensé entre 16 000 et 22 000 cas/an notifiés (détection de la bactérie dans les selles). L'**incidence** reste difficile à estimer : le pathogène ne serait recherché que pour un cas sur 1000 réels.

Une **recrudescence des cas** notifiés est observée à la **saison estivale** avec un maximum en septembre (phénomène de saisonnalité et prévalence variable sur l'année).

La **relation dose/réponse** n'est pas très bien appréhendée, et dépend de la sensibilité de l'hôte, des caractéristiques des aliments contaminés ingérés, des potentialités de colonisation et de virulence des souches et probablement du statut immunitaire du patient. Une étude ancienne [25] a consisté à administrer 2 souches de *C. jejuni* à 111 volontaires adultes à des doses variant de 8.102 à 2.109 UFC : il est aujourd'hui considéré que de **faibles doses seraient nécessaires à l'apparition des symptômes diarrhéiques** même si des études complémentaires seraient nécessaires pour le confirmer.

L'agence Santé publique du Canada a retenu une **DMI < 500**.

- Présence dans les eaux usées et abattement de la contamination par les traitements épuratoires

Les taux d'excrétion peu renseignés et les nombreux cas asymptomatiques en particulier chez les animaux permettent difficilement d'extrapoler des taux de contamination attendus en entrée de station d'épuration. Nous n'avons pas eu accès à des données moyennes ou saisonnières des concentrations en *Campylobacter* dans les eaux usées en France.

Les **concentrations dans les eaux usées** seront fonction de la prévalence de la maladie. En particulier, les **pics épidémiques** fin août/début septembre selon une étude allemande pourraient être corrélés avec les fortes pluies orageuses (Rechenburg, 2009) : les éventuels débordements des systèmes d'assainissement, les ruissellements plus importants sont susceptibles de contaminer les milieux et en particulier les eaux de baignade ou destinées à la consommation ou en contact avec des animaux.

Les traitements primaires et secondaires classiques abattraient entre 1,75 et 3,5 log toujours selon (Rechenburg, 2009) (1 à 3 log pour des indicateurs fécaux bactériens en boues activées).

Concernant les traitements tertiaires, l'effet du chlore sur l'inactivation de *C. jejuni* est reconnu : 0,1mg/L de chlore libre suffisent à l'éliminer (selon Santé Canada).

Des cas groupés de campylobactérioses ont cependant déjà été observés en France suite à des dysfonctionnements des systèmes de chloration d'eaux potables.

Concernant les **rayonnements UV** à 254 nm, il apparaît que cette bactérie est beaucoup plus sensible qu'*Escherichia coli* qui sert de base de comparaison (1,8 contre 5 mws/cm<sup>2</sup> nécessaires pour obtenir le même effet) [26]).

- Bilan et éléments manquants pour la caractérisation du risque

*Campylobacter spp* provoque des affections diarrhéiques (dites campylobactérioses) chez l'être humain et l'on considère en général qu'il s'agit de la source bactérienne de gastro-entérite la plus courante dans le monde. Dans moins de 1% des cas en France surviennent des complications.

Il semble **peu probable** aux vues des informations collectées **que des concentrations suffisamment importantes de *Campylobacter* soient encore présentes suite à des traitements tertiaires** et fonctionnels tels que les rayonnements UV ou la chloration. Cette dernière, même si elle est peu recommandée dans le cadre du traitement des eaux usées, a un bon effet bactéricide, y compris sur *Campylobacter spp* si elle est réalisée dans de bonnes conditions (chlore libre suffisant, limitation de la formation de THM). Nous n'avons pas de données spécifiques à *Campylobacter spp* concernant le lagunage ou la filtration.

Les **phénomènes épidémiques** pourraient éventuellement majorer le risque en fin de période estivale correspondant à des périodes d'arrosage.

*Campylobacter* spp et en particulier *C. jejuni* thermotolérant, le plus fréquemment mis en cause dans les cas de campylobactériose, survit mieux à des températures basses (<10°C) qu'à température ambiante dans les eaux peu aérées et ce jusqu'à 60 jours pour certaines souches sans être nécessairement cultivable. La bactérie se développe préférentiellement à des températures élevées (42°C). Les eaux usées traitées et transportées jusqu'au point d'arrosage seront vraisemblablement sujettes aux températures estivales élevées : une reviviscence est-elle possible dans les tuyaux chauffés par le soleil ?

De faibles **doses infectieuses** semblent avoir été mises en évidence (DMI < 500) même si peu d'études le confirment. Les scénarii par ingestion directe volontaire ou involontaire d'eau ne seront peut être pas à exclure en particulier pour les enfants de moins de 5 ans, les plus sensibles et susceptibles de s'exposer.

Peu de données ont été évoquées concernant la survie du pathogène dans les sols qui semblent cependant très **sensibles aux UV** et donc à l'exposition solaire ainsi qu'à la **dessiccation**, également importantes en période estivale.

## **B. Escherichia coli**

[7, 27-29]

### ▪ Caractéristiques, pathogénicité et réservoir

Le genre *Escherichia* fait partie de la famille des entérobactéries et comprend cinq espèces dont une seule, l'*Escherichia coli*, est utilisée à titre d'indicateur de la qualité des eaux, potables et usées. La presque totalité des souches d'*E. coli* ne sont pas pathogènes puisque cette bactérie est un hôte normal de l'intestin des mammifères. Néanmoins, quatre principaux groupes de **souches pathogènes** d'*E. coli* ont été mis en évidence : entéropathogène (EPEC), entérotoxigénique (ETEC), entéroinvasif (EIEC), entérohémorragique (EHEC).

Le groupe EPEC, habituellement responsable de diarrhées néonatales, est associé à une fréquence élevée de mortalité chez les jeunes enfants. Le groupe ETEC comprend des souches qui affectent particulièrement les personnes qui voyagent qui boivent de l'eau non traitée. Les souches du groupe EIEC induisent une infection similaire à la dysenterie bactérienne (*Shigella dysenteriae*). Le groupe EHEC comprend notamment le **sérotype O157:H7**, le plus souvent identifié dans l'ensemble des pays industrialisés. L'infection, qui se caractérise notamment par une diarrhée sanguinolente, peut entraîner le syndrome hémolytique et urémique (SHU, correspondant à une défaillance rénale aiguë qui se développe chez environ 5 % des patients infectés), principale cause d'insuffisance rénale chez l'enfant et responsable d'un taux de mortalité variant de 0,6 à 5 % chez les personnes atteintes de ce syndrome. Les déclarations d'infections à *E. coli* O157:H7 sont toutefois plus souvent associées à des intoxications d'origine alimentaire plutôt qu'hydrique.

Les personnes les plus à risque à l'égard des souches pathogènes, notamment la O157:H7, sont habituellement les **enfants de moins de 5 ans**, avec une incidence moyenne d'infection de 8,5/100 000 comparativement à 1,6/100 000 pour l'ensemble de la population, ainsi que les **personnes âgées**.

*E. coli* entéropathogène est extrêmement infectieux pour les nourrissons. La **dose infectieuse** est, chez les adultes, de **10<sup>8</sup> à 10<sup>10</sup> organismes par ingestion**.

**Le réservoir est humain**. Certains animaux peuvent constituer un réservoir d'*E.coli* entéropathogène.



### ▪ Survie dans l'environnement et traitement tertiaire

L'*E. coli* peut survivre jusqu'à deux à trois mois dans une eau naturelle non traitée, mais est très sensible à la chloration, étant rapidement inactivé par une concentration de chlore résiduel libre variant de 0,2 à 1 mg/l. Les bactéries n'ayant pas été inactivées ou détruites par la chloration sont par ailleurs capables de survivre pendant quelques jours sans toutefois proliférer.

### ▪ Risque associé à *E. coli*

Par ingestion, la dose infectieuse est très élevée, de l'ordre de  $10^8$  à  $10^{10}$  organismes. Suite à un traitement tertiaire de l'eau usée, il est peu probable qu'une telle quantité de microorganismes puisse être présente dans quelques ml d'eau usée traitée arrosée (on peut considérer que seuls quelques ml seront ingérés par la personne exposée, lors d'une ingestion volontaire ou accidentelle). En effet, la teneur en *E. coli* dans les effluents bruts est comprise entre  $10^4$  et  $10^8$ /100 ml et les traitements tertiaires peuvent abattre jusqu'à 6 unités log de la contamination microbienne (même en considérant un abattement moyen de 4 unités log des traitements tertiaires, la concentration en *E. coli* dans l'effluent traité est inférieure à la DMI). Le risque de contamination par *E. coli* lors de l'aérosolisation d'eaux usées traitées pour l'arrosage des espaces verts est faible.

## C. *Legionella*

### ▪ Caractéristiques, réservoirs et survie dans l'environnement

Les légionelles sont des bactéries à gram négatif vivant principalement en milieux hydriques non salés tels que les lacs et les rivières. Parmi les 50 espèces recensées, *Legionella pneumophila* est à l'origine, dans 98 % des cas, de l'infection respiratoire dénommée légionellose et représente 30% de l'ensemble des légionelles [30].

De plus elle peut avoir un développement intracellulaire chez les protozoaires et peut être véhiculée par des kystes d'amibes libres .

Les **conditions de températures pour leur développement sont de 25 et 45°C**. Elle est optimale à 36°+/-1°C.

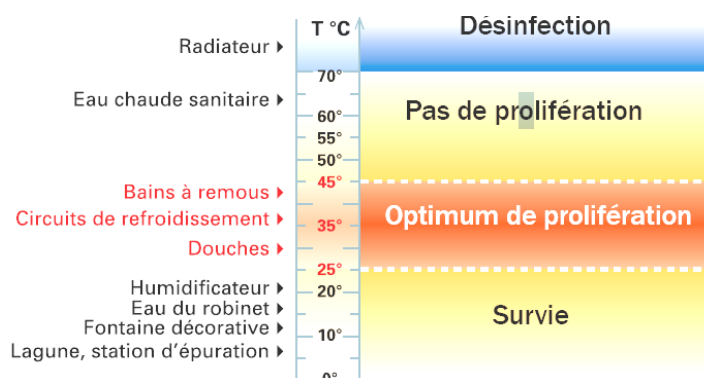


Figure 4 : Températures de survie et températures optimales de développement des légionelles  
(Source : MEDD)

Elles peuvent donc se trouver dans tous les **milieux aquatiques** naturels ou artificiels et notamment les installations sanitaires (douches, robinets, etc.), systèmes de climatisation, dispositifs de refroidissement par voie humide (tours aéro-réfrigérantes, circuits de refroidissement industriel), bassins et fontaines, eaux thermales, humidificateurs, jacuzzi, brumisateurs et équipements médicaux producteurs d'aérosol...

▪ Contamination, pathogénicité, épidémiologie et sources d'exposition

**La seule voie mise en évidence de contamination de l'homme est l'inhalation d'eau contaminée diffusée en aérosols.** Pas de transmission inter-humaine n'a pour l'instant été observée.

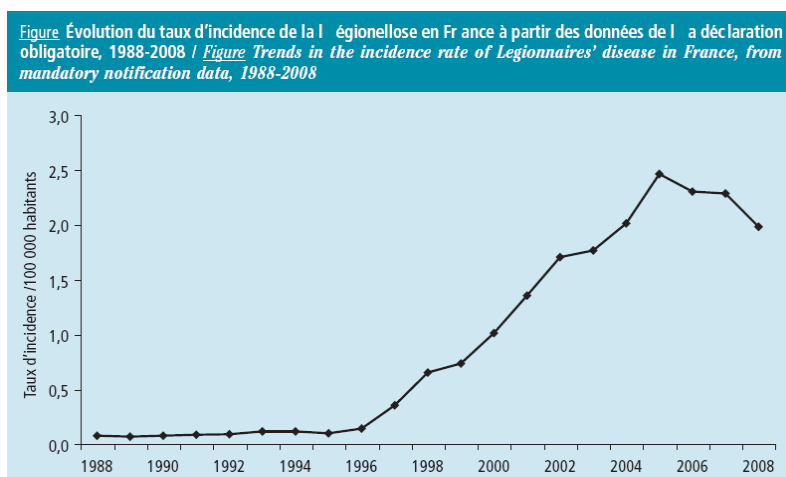
Dans 95 % des cas, une forme bénigne appelée fièvre de Pontiac apparaît et l'infection se traduit par un syndrome grippal avec fièvre, frissons, douleurs musculaires, maux de tête, vertiges et parfois diarrhée. Rarement diagnostiquée comme une infection à *Legionella*, cette forme guérit spontanément en 2 à 5 jours.

**Dans 5 % des cas, une forme grave Appelée Maladie des Légionnaires ou légionellose** se traduit par une infection pulmonaire, souvent sévère, associée à des troubles digestifs et une confusion mentale. L'incubation est classiquement de 2 à 10 jours et le diagnostic peut être fait dans les 24-36 h. **Cette forme entraîne le décès dans 10 à 30 % des cas. Elle peut être guérie par la prise d'antibiotiques dès l'apparition des premiers symptômes.** Cette pneumopathie doit son nom à une épidémie survenue en 1976 chez des combattants de l'American Legion réunis en congrès à Philadelphie.

Une plus forte incidence de la légionellose est observée chez les hommes que chez les femmes. En effet cette maladie peut être associée à plusieurs facteurs de risque tels que l'âge croissant, le sexe M, le tabac et l'alcool, l'immunodépression, le cancer, le diabète, la corticothérapie, les affections respiratoires chroniques.

Au cours des dernières années, la surveillance de la légionellose, maladie à déclaration obligatoire, s'est nettement améliorée en France et les données récentes ont montré une diminution de l'incidence.

Selon le BEH d'août 2009, en 2008, 1 244 cas ont été enregistrés en France, soit une incidence de 2,0/10<sup>5</sup>. L'âge médian est de 61 ans, le sexe-ratio homme/femme de 3,0 et la létalité de 10 %. Une exposition à risque était rapportée pour 38 % des cas. La majorité des cas ont été diagnostiqués par un test de détection urinaire et une souche a été isolée chez 213 cas (17 %).



*Figure 5 : Evolution du nombre de cas de légionelloses  
(Source BEH Août 2009)*

En 2008, **les diverses sources d'exposition** qui ont pu être mise en évidence sont présentées dans l'extrait de tableau suivant. Seulement 38% des cas de légionelloses déclarés ont donc été reliés à une source probable d'exposition. Les autres expositions correspondant aux expositions professionnelles, les ERP, jacuzzi. **Il s'agit pour l'ensemble d'installations garantissant une température optimale 37°C (25°C – 45°C) et une aérosolisation.**

Expositions*	2008 (1 244 cas)	
	n	%
Hôpital	83	7
Maison de retraite	56	5
Station thermale	9	< 1
Voyage	248	20
Hôtel-camping	164	13
Résidence temporaire	42	3
Autres types de voyage**	42	3
Autres expositions***	75	6
Total des cas ayant au moins une exposition	471	38

*Tableau 14 : Sources d'exposition à risque légionelles mises en évidence en 2008  
(Source BEH Août 2009)*

▪ Présence dans les eaux usées et abattement de la contamination par les traitements épuratoires

De récentes investigations de l'INVS (fin de l'été 2007, [31]) ont pointé les installations d'une station d'épuration pour expliquer 9 cas groupés de légionelloses chez des patients fréquentant la zone à proximité. L'hypothèse que le réacteur de nitrification (Circox) a été le facteur de dispersion majoritaire est très plausible. Et selon l'INVS, cette épidémie rappelle que, si les TAR restent des sources privilégiées de dispersion de légionelles à l'origine d'épidémies, **toute installation propice à leur prolifération, à la formation d'aérosols et à leur dispersion doit être considérée lors des investigations.** En particulier, les Circox et les stations d'épuration d'eaux usées avec aération de surface font partie de ces installations à risque.

Les légionelles peuvent donc bien être présentes dans les eaux usées voire y proliférer si les conditions de température adéquates sont présentes (25°C – 45°C).

L'ensemble des moyens de prévention de la légionellose notamment dans les réseaux d'eaux sanitaires ou les TAR a fourni une somme d'informations assez intéressantes quant au comportement des légionelles face à certains traitements de désinfection.

**Selon office fédéral santé publique, Suisse [32],** la chloration continue peut empêcher la prolifération des légionelles, mais il faudrait que la concentration de chlore libre atteigne au moins 2 mg/l. **En effet, les légionelles sont beaucoup plus résistantes au chlore que les autres bactéries.** Toujours selon cette étude, **les rayons ultraviolets avec une longueur d'onde comprise entre 220 et 280 nm (UV-C)** ont une action bactéricide, mais n'agiraient que dans les eaux claires et uniquement à faible distance (pouvoir de pénétration < 3 cm).

**Les UV-C utilisés pour la désinfection de l'eau potable sont efficaces sur les légionelles libres, mais n'atteignent pas les germes cachés dans le biofilm surtout quand elles se cachent dans les kystes d'amibes.**

Concernant l'ultrafiltration, s'agissant d'une bactérie, elle devrait être retenue à « 100% » en bon fonctionnement.

▪ Bilan et éléments manquants pour la caractérisation du risque

*Legionella Pneumophila* provoque une forme grave de pneumopathie dite légionellose ou encore maladie du légionnaire dans 5% des cas chez l'être humain.

LP est présente dans tous les milieux hydriques où elle peut survivre sans proliférer sur une grande fourchette de température ( 0 à 70°C) et profitent de conditions artificielles de température optimales à son développement (25°C – 45°C) pour s'installer dans les conduites d'eaux chaudes sanitaires, les TAR... en particulier lorsque celles-ci sont mal entretenues ou favorisent la formation de biofilms. Des moyens « simples » d'éradication de la bactérie sont employés

régulièrement pour lutter contre sa prolifération : hyperchloration, montée forte en température...

Il est possible, au même titre que les eaux de consommation, que des légionnelles soient encore présentes suite à des traitements tertiaires de désinfection tels que la chloration ou même les UV et particulièrement lorsque celles-ci sont hébergées par des amibes, dans les eaux usées traitées. L'ultrafiltration restant le moyen le plus sûr de minimiser sa présence en sortie de STEP.

Il n'est pas improbable non plus que des eaux puissent stagner dans les systèmes d'arrosage et fournir des conditions optimales à la croissance de légionnelles (températures estivales).

Pas de dose infectieuse n'a été mise en avant mais les autorités sanitaires s'entendent pour dire qu'une concentration  $LP > 1000$  UFC/L doit servir d'alerte et inciter à la mise en place de mesure de désinfection dans les TAR. A  $10^5$  LP/L, un arrêt de fonctionnement est demandé.

Très grossièrement, un risque non négligeable semble transparaître de l'ensemble de nos données mais beaucoup d'informations manquent à ce raisonnement et particulièrement pour une évaluation quantitative.

L'AFSSET pointait encore en 2006 [30] l'ensemble des points à approfondir concernant légionnelle qui soutiendront peut être, à l'avenir, des démarches quantitatives en évaluation des risques :

- l'écologie des légionnelles et les facteurs de leur développement dans les milieux hydriques artificiels;
- les outils de détection des bactéries dans les aérosols et dans l'eau ;
- les facteurs de risque individuels sachant qu'il existe une grande variabilité entre les individus ;
- des études de modélisation mathématique de la croissance de ce germe en vue de microbiologie prévisionnelle ;
- le développement de techniques rapides de détection et de dénombrement des *Legionella* ;
- la dose infectante à partir de laquelle les légionnelles présentent un risque pour la santé.

## D. *Leptospira*

### ▪ Caractéristiques, réservoirs et survie dans l'environnement

Les leptospires sont des bacilles Gram négatif (6 à 12 microns), de forme hélicoïdale, extrêmement mobiles, **aérobies**, responsables d'anthropo-zoonoses endémiques dans le monde entier. Les bactéries du genre *Leptospira* sont divisées en deux espèces : ***Leptospira interrogans*, pathogène pour l'homme** et *Leptospira biflexa*, saprophyte des eaux douces. Les *Leptospira interrogans* se répartissent en plus de 200 sérovars qui sont regroupés actuellement en 23 sérogroupes. Une quinzaine seulement de ces sérogroupes est généralement retrouvé chez l'homme (selon l'Institut Pasteur, centre de référence pour *Leptospira*).

**Les leptospires pathogènes sont excrétées dans les urines des animaux ou des patients contaminés. Elles peuvent être présentes en quantité dans les eaux de surface, les sols boueux, sur les végétaux et dans les boues. Les inondations augmentent leur diffusion.** On pense que leur propagation est favorisée en cas de fortes précipitations, du fait du ruissellement des eaux pluviales provenant de zones contaminées vers les eaux de surface.

Bactéries des milieux humides, elles sont tuées par déshydratation ou à des températures supérieures à 50°C. **Elles survivent et peuvent rester viables plusieurs semaines à plusieurs mois dans des terres contaminées**, plusieurs semaines dans du purin [33].

De très nombreuses espèces peuvent être porteuses de leptospires : les rongeurs des milieux urbains, rats, souris, les campagnols, les hérissons, les musaraignes, les renards, les chiens, les chauves-souris...

- Contamination, pathogénicité, épidémiologie et sources d'exposition

Selon Santé Canada [34], chez l'humain, l'infection peut survenir suite à un contact direct avec l'urine d'animaux infectés **ou par contact indirect avec de l'eau, de la terre ou de la boue contaminée. Les leptospires s'introduisent dans le corps par des lésions ou des écorchures ou par les muqueuses des yeux, du nez ou de la bouche.** L'ingestion d'eau contaminée et l'inhalation de leptospires transportés par aérosols constituent également des voies d'infection possibles.

Les affections consécutives à une infection à *Leptospira* peuvent être de diverse gravité, allant **de troubles légers de type grippal à une maladie plus grave, et parfois mortelle.** La maladie se signale tout d'abord par de la fièvre, des frissons, des céphalées, des douleurs musculaires, des vomissements et un rougissement des yeux. En règle générale, les patients se remettent complètement de la forme légère de la maladie, bien que la récupération puisse être longue, durant parfois des mois, voire des années.

En l'absence de traitement, la maladie peut évoluer vers une forme plus grave. Les cas graves peuvent être mortels, **la mort survenant par insuffisance rénale, insuffisance cardiorespiratoire ou fortes hémorragies.**

La maladie peut être difficile à diagnostiquer car elle est souvent confondue avec d'autres infections ou troubles ayant des symptômes similaires. De même, il se pourrait que la forme légère ne soit pas toujours déclarée. La leptospirose est considérée comme plus préoccupante dans les pays en développement et sous les climats tropicaux.

Selon l'INVS [35], en France sur la période 2001-2003 : de 286 à 365 cas annuels en métropole et de 260 à 357 dans les Dom-Tom ont été recensés avec des fluctuations annuelles peu marquées en métropole et peu de fluctuations mensuelles d'une année sur l'autre ; en France métropolitaine, les incidences maximales ont été observées en Aquitaine, Basse-Normandie et Champagne-Ardenne.

**La vaccination** contre la leptospirose est peut être justifiée pour toutes les personnes exposées au risque des maladies professionnelles : travaux exposant au contact d'animaux porteurs de leptospires, d'eaux ou de lieux humides susceptibles d'être souillés par leurs déjections (urines, selles) ; travaux effectués dans les mines, les carrières, les tranchées, les tunnels, les galeries, **les égouts**, les caves les chais et les souterrains ; travaux d'aménagement et d'entretien des cours d'eau et de drainage ; travaux effectués dans les cimenteries, les abattoirs, les boucheries, les chantiers d'équarrissage, les usines de dé lainages, les cuisines, les conserveries, les laiteries, les brasseries ; gardiennage, entretien et réfection des parcs aquatiques, piscicultures ; travaux exécutés sur les bateaux et péniches. Elle est souhaitable également pour les vétérinaires.

**En dehors des circonstances professionnelles elle peut être proposée aux voyageurs se rendant dans des lieux éloignés à haute prévalence de la leptospirose :** randonneurs en zones de rizières ou d'eaux mortes, rafters, spéléologues, plongeurs en eau douce, secouristes intervenant en zone d'inondation ou de tremblement de terre.

- Présence dans les eaux usées et abattement de la contamination par les traitements épuratoires

Présente dans les urines des personnes infectées, les leptospires sont donc bien présentes dans les eaux usées sans véritable phénomène de saisonnalité. Elles sont sensibles au désinfectant tel que le chlore. Nous n'avons pas d'informations spécifiques à l'abattement des leptospires par les traitements tertiaires tels qu'UV ou ozonation (se reporter aux généralités sur les bactéries): bactéries de 2 à 5 µm, elles sont retenues par les procédés standards d'ultrafiltration.

- Bilan et éléments manquants pour la caractérisation du risque

*Leptospira* provoque des affections bénignes de type grippal pouvant évoluer vers des complications plus graves d'insuffisance rénales, cardio-respiratoires voire hémorragiques parfois mortelle.

En France 300 à 400 cas, sporadiques ou groupés mais sans épisode épidémique, sont recensés chaque année sans phénomène de saisonnalité ou de fluctuations temporelles particulières.

Pathogène zoonotique présent chez de nombreuses espèces mais majoritairement et de manière asymptomatique chez le rat, la souris, la musarègne, les animaux sauvages..., il est excrété dans les urines de ces animaux pouvant contaminer les sols et les eaux en contact avec les hommes (les chiens sont également soulignés comme sensibles) qui à leur tour excrètent les leptospires.

La voie de contamination retenue pour la présente étude est le contact : il suppose que la personne exposée présente des égratignures au niveau des mains ou des pieds par exemple au contact du sol, ou qu'il soit aspergé au niveau d'une plaie.

Il est à remarquer que la vaccination est proposée à de nombreuses professions à risque : nous citerons en exemple les égoutiers.

Nous n'avons récolté que peu d'informations quantitatives relatives à ce pathogène concernant sa concentration dans les eaux usées *a priori* majoritairement expliquées par les excréments via les urines du réservoir principal : les rats, puisqu'il n'y pas de phénomène épidémique décrit chez les hommes. Nous n'avons pas non plus de données précises sur son comportement spécifique face aux traitements tertiaires : il est sensible à la chloration. Pour les autres traitements se référer aux généralités sur les bactéries.

Résistant bien dans l'environnement naturel humide, il ne s'y développe cependant pas (zoonotique) : pas de reviviscence n'est à craindre sur le site d'arrosage.

Nous n'avons pas de notion de la dose infectieuse minimale.

## E. *Salmonella*

[7, 36]

- Caractéristiques, pathogénicité et réservoir

Les bactéries *Salmonella* sont des **entérobactéries** que l'on retrouve chez l'homme, les mammifères (rongeurs), les oiseaux (volailles) et les animaux à sang froid (reptiles). Elles sont responsables, après pénétration par voie orale, de nombreuses infections (les salmonelloses), notamment des **fièvres typhoïde et paratyphoïdes** (maladies à déclaration obligatoire n° 1), des **gastro-entérites** et des toxi-infections alimentaires collectives (maladies à déclaration obligatoire n° 12).

Le principal mode de contamination chez l'homme est l'ingestion à partir de l'eau (*S.typhi* surtout) ou d'aliments contaminés (ex. produits laitiers, œufs, viande).

Les *Salmonella* dites « mineures » (*Salmonella typhi murium, enteritidis, dublin, etc...*), ubiquitaires, sont ingérées avec une boisson ou un aliment contaminé (cas sporadiques) ou après **contamination fécale-orale**, souvent par les mains sales (épidémies de collectivités d'enfants). Il peut s'ensuivre des infections purement digestives, les gastro-entérites. Celles-ci se traduisent par de la diarrhée, des vomissements et de la fièvre. Leur évolution est en général bénigne. Certains sujets restent porteurs sains de *Salmonella* dans leur tube digestif et peuvent dans certaines circonstances disséminer leur souche.

Les symptômes associés à la salmonellose (diarrhée, fièvre et crampes abdominales) se déclenchent de 8 h à 72 h après la contamination. La plupart des adultes atteints ressentent ces symptômes durant de quatre à sept jours et se rétablissent ensuite.

Par contre, les symptômes habituels peuvent s'imposer avec nettement plus d'intensité **chez les nouveau-nés, les jeunes enfants et les personnes âgées ou chez celles ayant une déficience immunitaire** (cancéreux, sidéens) : les *Salmonella* mineures sont susceptibles de franchir la barrière intestinale et de provoquer un syndrome septicémique de type typhoïdique avec hémocultures positives. De plus, dans la fièvre typhoïde (*S. typhi*), la bactérie peut traverser la barrière intestinale, passer dans la circulation sanguine et aller ainsi s'installer dans les reins, le foie, la vessie, le cœur, les articulations, etc. Parfois, l'infection peut être fatale si on n'utilise pas immédiatement des antibiotiques.

*Salmonella* est répandue dans le monde entier, mais de façon plus importante en Amérique du Nord et en Europe (beaucoup de cas sont importés). L'incidence est plus élevée chez les nourrissons et les jeunes enfants. De grandes épidémies peuvent être recensées dans les hôpitaux, les établissements, les foyers d'accueil, les restaurants. Pour exemple, 2 à 3 millions de cas d'infection surviennent chaque année aux États-Unis, mais la plupart ne sont pas signalés. En 2001, 92 cas de fièvres typhoïdes et paratyphoïdes sont apparus en France. L'incidence était de 0,15 pour 100 000 habitants (elle est inférieure à 1 cas pour 100 000 depuis la fin des années 1980) (Haeghebaert, 2003). En 2002, l'incidence était de 0,20 cas pour 100 000 habitants (Vilagines, 2003).

La **dose infectieuse est de 100 à 1000 organismes** par ingestion mais elle varie selon de nombreux facteurs et peut atteindre **10<sup>6</sup> bactéries**.

- Survie dans l'environnement et traitement tertiaire

*Salmonella* se caractérise par une **survie importante dans l'environnement**. Sa survie peut atteindre jusqu'à deux mois dans les eaux de surface, un mois sur les plantes et près de 70 jours sur le sol.

Le **devenir de *Salmonella* dans les aérosols** influence aussi sa survie. En effet, lorsque l'atmosphère n'est pas saturée, une évaporation brutale suit la pulvérisation : il y a transformation des gouttelettes en poussières transportées par le vent. Cette déshydratation entraîne une disparition importante de la population bactérienne initiale (les virus et les spores résistent mieux à la dessiccation). D'après une étude du Cemagref sur les aérosols d'eaux résiduelles (1982), seuls 5% des germes totaux survivent après un trajet aérien de quelques dizaines de mètres.

Par ailleurs, ***Salmonella* est sensible aux traitements tertiaires**. Pour exemple, en 2006, un projet de réutilisation des eaux usées traitées à Narbonne afin de permettre l'arrosage de quatre espaces verts publics sans contraintes de distances de sécurité vis-à-vis des zones de présence humaine a consisté à mettre en œuvre un traitement tertiaire de désinfection poussée en sortie de la station d'épuration de Narbonne. Le traitement tertiaire proposé était une microfiltration suivie d'une désinfection UV et d'une chloration (hypochlorite de sodium). Les essais pilotes ont montré que les performances microbiologiques souhaitées concernant *Salmonella* étaient atteintes : 0 dans 5L.

- Risque associé à *Salmonella*

*Salmonella* peut survivre plusieurs mois dans l'environnement. Néanmoins, en tant que bactérie, elle est sensible à la dessiccation brutale provoquée par l'aérosolisation de l'eau usée traitée : sa concentration dans l'environnement est alors fortement diminuée (diminution de 95%). De plus, les traitements tertiaires classiques, comme la désinfection UV, ont un effet bactéricide important sur *Salmonella*.

La dose infectieuse peut être élevée, jusqu'à 10<sup>6</sup> bactéries. On retiendra néanmoins une DMI de 10<sup>3</sup> bactéries, valeur couramment utilisée à l'heure actuelle. Pour un abattement moyen de 4 unités log (abattement classique pour un traitement du type boues activées associé à un lagunage

tertiaire), les quantités ingérées seraient inférieures à la DMI. En effet, les teneurs en salmonelles dans les effluents bruts citées dans la littérature sont comprises entre 0 et  $10^3$  /100 ml.

A la vue de ces considérations, il apparaît que le risque associé à *Salmonella* lors de l'aérospersion d'eaux usées traitées est faible. Cela pourrait se traduire par une absence de risque pour les individus sains (il existe des individus sensibles pour lesquels la DMI peut être plus faible).

## F. *Shigella*

[7, 37]

### ▪ Caractéristiques, pathogénicité et réservoir

*Shigella* spp. appartient à la famille des *Enterobacteriaceae*. C'est une bactérie en bâtonnet, à Gram négatif, non encapsulée et immobile. On recense quatre sérogroupes. La bactérie *Shigella dysenteriae*, responsable de la dysenterie bacillaire et qui peut produire une entérotoxine (toxine de *Shiga*), est la forme la plus sévère des shigelloses (des complications comme l'hypoglycémie et déshydratation pouvant survenir et causer des formes graves voire mortelles). En France, c'est l'espèce *Shigella sonnei* qui est le plus souvent retrouvée. Elle serait responsable de 80% des shigelloses observées dans notre pays.

La pathologie associée à *Shigella* est une maladie aiguë du côlon et de l'intestin grêle entraînant diarrhée, fièvre, nausées et parfois toxémie, vomissements, crampes et ténésme. Des infections bénignes et asymptomatiques peuvent aussi survenir. La gravité de la maladie varie selon la nature de l'hôte, la dose et le sérotype (le taux de létalité des infections à *S. dysenteriae* peut atteindre 20 % chez les malades hospitalisés alors que celui des infections à *S. sonnei* est négligeable).

*Shigella* est répandu dans le monde entier. Les deux tiers des cas et la plupart des décès surviennent chez les enfants de moins de 10 ans. Les épidémies se produisent dans les endroits surpeuplés où les conditions sanitaires sont médiocres.

Le mode de transmission est direct ou indirect **par voie fécale-orale** à partir d'un malade ou d'un porteur. Les mauvaises pratiques d'hygiène contribuent à propager l'infection de façon directe, par contact physique, ou de façon indirecte, par contamination des aliments.

La période d'incubation est de 1-7 jours et *Shigella* est transmissible au cours de la phase aiguë de l'infection et tant que la bactérie n'a pas disparu des fèces, c'est-à-dire 4 semaines environ après la maladie. Les porteurs asymptomatiques peuvent aussi transmettre l'infection.

La **dose infectieuse est 10-200 organismes**, par ingestion.

**L'humain est le seul réservoir** appréciable et la transmission inter-humaine est fréquente, du fait de la faible dose infectante.

### ▪ Survie dans l'environnement et traitement tertiaire

*Shigella* survit moins de deux mois dans une eau de surface et moins de 10 jours sur les plantes. Entre 10 et 10000 organismes peuvent être présents par litre d'eau usée.

### ▪ Risque associé à *Shigella*

Il est difficile de conclure sur le risque associé à *Shigella*. En effet, la dose infectieuse est faible (10 à 200 organismes par ingestion) et la quantité de microorganismes potentiellement présents dans une eau usée est variable : de 10 à 10000 bactéries/L. En considérant un abattement moyen de 4 unités log pour un traitement tertiaire, quelques organismes peuvent se retrouver dans un litre



d'eau usée traitée. Pour une exposition lors de l'aéropersion d'eaux usées traitées, seuls quelques ml seront ingérés a priori (sauf dans le cas d'une ingestion volontaire de l'eau comme eau de consommation). Le risque est faible pour la population générale. Certaines personnes, plus sensibles, auront un risque plus important de contamination (la DMI est souvent plus faibles pour les personnes sensibles, comme les immunodéprimés).

## G. *Vibrio cholerae*

Selon le Professeur P. Berche (Faculté de Médecine Necker-Enfants Malades, PARIS V) <http://www.microbe-edu.org/>

### ▪ Caractéristiques, pathogénicité, réservoir et épidémiologie

Le choléra est une maladie diarrhéique très contagieuse, due à un bacille à Gram négatif, *Vibrio cholerae*. Cette **bactérie pathogène** a un tropisme exclusivement digestif et vit à l'état saprophyte dans l'eau des estuaires. Les souches bactériennes responsables du choléra sont transmises par **voie orale à partir d'eau ou d'aliments contaminés** et appartiennent aux sérovars O1 et O139.

Le choléra est une maladie strictement humaine entraînant une **diarrhée** avec une déshydratation aiguë. Après une courte incubation (quelques heures à 5 jours), la maladie débute par une diarrhée fécaloïde, puis aqueuse sans fièvre, associée à des douleurs violentes épigastriques et abdominales et des vomissements. Cependant, l'infection par *V. cholerae* est souvent **asymptomatique (90% des cas)**, avec élimination des bactéries dans les selles pendant plusieurs jours.

*V. cholerae* est une bactérie **retrouvée dans l'environnement**, particulièrement dans les eaux saumâtres des estuaires, les lits des fleuves et au contact du zooplancton, des algues marines et des plantes aquatiques dans la plupart des zones côtières des régions tempérées ou tropicales du monde. Elle survit pendant 50 jours dans l'eau de mer à 5-10°C, 10-12 jours à 30-32°C.

Au cours du choléra, *V. cholerae* est éliminé pendant 5-10 jours en très fortes quantités (10<sup>9</sup> bactéries / ml) dans les selles aqueuses des patients (parfois 10-20 l/ jour). Les **porteurs sains** très nombreux au cours des épidémies sont un important **vecteur de propagation du choléra**.

Le risque de contamination en zone d'endémie vient de l'eau stagnante massivement polluée (égouts, fèces) et de la contamination des mains qui contribuent à la contamination de la nourriture. Le choléra est une « maladie des mains sales ».

La dose infectante est élevée chez les personnes sans facteur de risque, et varie en fonction de l'acidité gastrique. En effet, elle est, chez les sujets sains, comprise entre 10<sup>6</sup> et 10<sup>11</sup> organismes, par ingestion.

### ▪ Survie dans l'environnement

*Vibrio cholerae* survit pendant de longues périodes dans l'environnement. Elle survit facilement dans l'eau et peut survivre jusqu'à 16 jours dans le sol.

### ▪ Risque associé à *Vibrio cholerae*

*V. cholerae* est transmis par voie orale par l'eau contaminée. *V. cholerae* peut se retrouver dans les eaux usées à des concentrations comprises entre 100 et 100 000 pour un litre. Il nous manque aujourd'hui des données sur l'abattement de *V. cholerae* par les différents types de traitement tertiaire des eaux usées pour conclure sur le risque d'être contaminé lors d'une exposition par aéropersion. Cependant, la DMI par ingestion est très élevée et on peut donc considérer que le risque est faible. De plus, en France métropolitaine, le risque est limité car le choléra a été éradiqué. Les quelques cas sont très souvent importés.

## H. Virus Coxsackie

<http://www.vulgaris-medical.com/encyclopedie/coxsackie-1269.html> et <http://www.phac-aspc.gc.ca/msds-ftss/msds44f-fra.php>

Date : January 2000 Préparée par : Bureau de la sécurité des laboratoires, ASPC

### ▪ Caractéristiques, pathogénicité, réservoir et épidémiologie

Le virus Coxsackie appartient aux entérovirus, de la famille des Picornavirus, qui a été découverte en 1948, aux Etats-Unis par Dalldorf et Sickles chez les individus touchés par la poliomyélite antérieure aiguë. Le virus a été dénommé Coxsackie, du nom du village où habitaient ces malades. C'est un virion icosaédrique sans enveloppe, de diamètre de 20 à 30 nm, à ARN monocaténaire, linéaire, de polarité positive. Il existe deux groupes de Coxsackie : A (24 sérotypes) et B (16 sérotypes).

On distingue habituellement **2 virus Coxsackies (A et B)**. Le virus Coxsackie A est responsable de diverses pathologies (fièvre aphteuse, herpangine ou pharyngite vésiculeuse, stomatite vésiculeuse, atteinte des voies respiratoires, dermatoses, hépatite, méningite bénigne à lymphocyte, grippe estivale). Le virus Coxsackie B est aussi responsable d'un grand nombre de pathologies (myalgie épidémique, infections touchant l'appareil respiratoire, éruptions cutanées, pathologies cardiaques, pathologies nerveuses, diarrhée). Les virus Coxsackies sont également à l'origine d'autres pathologies : conjonctivite, péricardite, simple rhume.

Le virus est répandu dans le monde entier et les taux sont élevés en été et en automne. Le **réservoir** de ce virus est uniquement humain. Les enfants âgés de moins de 10 ans sont particulièrement vulnérables et le virus est souvent à l'origine d'épidémies dans les garderies et les pouponnières.

Les dangers primaires sont l'ingestion et inhalation d'aérosols infectés puisque les modes de transmission sont : par contact direct avec des sécrétions nasopharyngiennes d'une personne infectée, **par voie fécale-orale, et par inhalation d'aérosols infectés**. La transmission du virus se fait pendant la phase aiguë de la maladie, et probablement durant une période plus longue, puisque le virus peut être isolé de fèces plusieurs semaines après la maladie.

La dose infectieuse est de moins de 18 unités infectieuses par inhalation pour le virus Coxsackie A21.

L'agent est relativement stable et résiste une journée à des pH de 2,3 à 9,4 et 30 minutes à des températures de 50 à 60 °C. Ils restent viables durant plusieurs semaines dans des selles conservées à la température ambiante.

### ▪ Risque associé au virus Coxsackie

Le virus coxsackie appartient à la famille des entérovirus.

Le nombre de virus dans un litre d'eau usée est de 100 000 à 1 000 000. La quantité de virus éliminée par traitement tertiaire est de 99,983 à 99,999 % ; le nombre de virus après les étapes de coagulation, filtration et désinfection est de 0,007 à 170 virus par litre. Par ailleurs, la quantité infectieuse est par inhalation de moins de 18 unités infectieuses (pour le virus Coxsackie A21). Ces données suggèrent un risque non négligeable pour l'homme lors de l'aéropersion d'eaux usées traitées sur des espaces verts fréquentés par le public.

## I. Echovirus

### ▪ Caractéristiques, pathogénicité, réservoir et épidémiologie

Échovirus est un **virus** sans enveloppe à ARN mononucléaire. Il existe 30 sérotypes d'Échovirus reconnus (1-9, 11-27, 29-30). Les échovirus 22 et 23 ont été renommés paréchovirus humain 1 et

paréchovirus 2 respectivement, et l'échovirus de type 30 est maintenant un membre du genre Enterovirus.

La majorité des infections par échovirus sont inapparentes et les manifestations cliniques peuvent varier de légères à létales ainsi que d'aiguës à chroniques. Les effets pathogènes sont similaires à la **méningite aseptique**, associée de faiblesses musculaire et de paralysie, d'exanthèmes et d'érythèmes, ainsi que de problèmes respiratoires aigus fébriles.

En termes d'épidémiologie le virus est très répandu dans le monde entier. Un **pic d'incidence** est observé **en été et en automne**. Echovirus touche préférentiellement les **enfants** et il n'est pas rare de voir des épidémies dans les garderies.

Le réservoir du virus est humain et le mode de transmission prédominant est la **voie oro-fécale** et la transmission interhumaine est possible. Cependant, d'après les experts du groupe de travail « Réutilisation des Eaux Usées Traitées » de l'AFFSET, dans le cadre d'une aérospersion, le virus serait infectant par inhalation.

La dose minimale infectieuse n'est malheureusement pas connue et la période d'incubation dure de 2 à 14 jours. Les personnes infectées éliminent le virus dans les fèces plusieurs semaines après la disparition des symptômes. En moyenne, on trouve **10<sup>5</sup> à 10<sup>6</sup> entérovirus par litre dans les eaux usées** [7].

Echovirus est un **virus relativement résistant** : il n'existe aucun agent antiviral spécifique et il résiste aux désinfectants d'usage courant. Il existe tout de même des moyens physiques d'inactivation comme une exposition à une température de 50°C pendant 2 heures ou au chlorure de magnésium.

▪ Survie du virus dans l'environnement

Le temps de survie des entérovirus dans le sol est très variable et s'étend de 11 à 180 jours (cf. **tableau 16**). Cependant, les températures basses prolongent nettement la durée de survie et des entérovirus ont été retrouvés dans des sols plus de 6 mois après l'épandage de boues d'épuration [38]. En moyenne, le **temps de survie d'échovirus** dans l'environnement est d'environ **3 semaines**.

Virus	Composition du sol	Température et humidité	Durée de survie (jours)	Références
<i>Entérovirus</i>	Sable	3 à 10°C	70 – 170	BAGDASARYAN (1964)
		18 à 23°C	25 - 110	
			15 - 25	
<i>Poliovirus</i>	Sable	Humide	91	LEFLER and KOTT (1974)
		Sec	88	
	Sable et terreau	4°C	84	DUBOISE <i>et al.</i> , (1976)
		Humide	(90% de réduction)	
<i>Entérovirus</i>		20°C	84	BITTON <i>et al.</i> , (1984)
		Humide	(99,999 % de réduction)	
<i>Coxsackievirus</i>	Argile	Été humide	> 35	DAMGAARD-LARSEN <i>et al.</i> , (1977)
		Été sec	< 8	
<i>Poliovirus</i>		15 à 33°C	11	TIERNEY <i>et al.</i> , (1977)
		-14 à 2°C	89-96	
<i>Poliovirus et Coxsackievirus</i>	Sable et terreau	37°C humidité à saturation	12	YEAGER and O'BRIEN (1979)
		4°C humidité à saturation	180	
<i>Poliovirus</i>	Argile	15°C	16	STRAUB <i>et al.</i> , (1992)
		27°C	7.5	
	Sable	15°C	10,5	
		27°C	6,5	

Tableau 15 : Durée de survie des virus entériques dans le sol

- Risque associé à Echovirus

Echovirus peut être un virus préoccupant en termes de risque sanitaire étant donné sa **pathogénicité** (méningite aseptique), sa **forte présence dans les eaux usées** (de  $10^5$  à  $10^6$  virus par litre), sa forte résistance et sa **durée de survie** de 3 semaines dans le sol. Compte tenu des taux d'abattement d'un traitement tertiaire à l'ozone ou aux rayons UV, on obtient en sortie de traitement une quantité virale de  $10^3$  à  $10^4$  virus par litres. La dose infectieuse n'étant pas connue, on ne peut pas conclure sur le risque lié à Echovirus mais on ne doit pas l'écarter.

## J. Virus de l'Hépatite A

- Caractéristiques, pathogénicité, réservoir et épidémiologie

Le virus de l'hépatite A, plus connu sous le nom d'hépatite infectieuse ou **jaunisse**, est un virus non enveloppé à ARN monocaténaire.

Un grand nombre d'infections sont asymptomatiques mais celles qui le sont se caractérisent par de la fièvre, une sensation de malaise, des nausées et des gêne abdominale suivis après quelques jours d'un ictère. Le taux de létalité est faible et les rares cas de mortalité surviennent habituellement chez les malades âgés.

Le virus de l'hépatite A est répandu dans le monde entier et **sévit de façon sporadique et épidémique** : dans les établissements, les grands ensembles d'habitation et les garderies. Les infections par le VHA représentent 20-25 % des hépatites cliniquement apparentes dans le monde entier.

Le **réservoir** du virus de l'hépatite A est principalement **humain** mais quelques primates peuvent aussi servir de réservoir. Le mode de transmission se fait de personne à personne par la **voie oro-fécale** ou bien par ingestion d'eau et d'aliments (notamment des mollusques et crustacés) contaminés. La période d'incubation dure en moyenne de 28 à 30 jours. L'homme infecté excrète largement le virus dans ses selles 15 jours à 1 mois après sa contamination. Pendant cette période,  $10^6$  virus/g de selle de VHA sont excrétés. La **dose infectieuse** par ingestion est estimée entre **10 et 100 particules virales**.

Le VHA est résistant aux antibiotiques, partiellement **résistant à la chaleur** et reste infectieux après avoir été chauffé à 60°C pendant 10-12 heures. Il est également très résistant aux traitements classiques d'épuration. Il **conserve son pouvoir infectieux de plusieurs jours à plusieurs mois dans l'environnement**, dans des sédiments marins, dans de l'eau douce et de l'eau de mer[2].

- Risque associé au virus de l'Hépatite A

Le virus de l'hépatite A est moins fréquent dans les eaux usées françaises que certains autres pathogènes. La transmission préférentielle est oro-fécale, et l'existence d'une seule personne contaminée sur le réseau peut entraîner la présence de nombreux virus dans les eaux usées ( $10^6$ /g de selle pendant la période d'infection). D'autre part, plusieurs caractéristiques font du virus de l'Hépatite A (VHA) une source d'inquiétudes vis-à-vis du risque sanitaire : sa forte **résistance aux traitements** classiques des stations d'épuration, sa **persistance dans l'environnement** (et donc son éventuelle accumulation dans les sols), et enfin sa **faible dose infectieuse** (10 à 100).

Il pourrait donc être intéressant de contrôler les concentrations en VHA en sortie de traitement tertiaire. La mesure des agents viraux est rarement pratiquée, bien que les indicateurs de contamination fécale ne soient pas des indicateurs de la présence ou non du virus.

## K. Rotavirus

### ▪ Caractéristiques, pathogénicité, réservoir et épidémiologie

Rotavirus humain est un virion non enveloppé à ARN bicaténaire. Il existe sept principaux sérogroupes (A-G), et la plupart des souches humaines correspondent au séro groupe A, mais de grandes épidémies associées au séro groupe B ont été signalées en Chine.

Rotavirus infecte les cellules matures des villosités de l'épithélium de l'intestin grêle et entraîne de la fièvre et des vomissements suivis d'une **diarrhée aqueuse**, parfois associé à une déshydratation sévère et létale chez l'enfant. Les **troubles neurologiques** associés au déséquilibre électrolytique vont de la méningite aseptique à l'hémorragie sous-durale.

Le virus est répandu partout dans le monde et constitue la principale cause de **gastro-entérite chez les enfants**, notamment ceux âgés de 4 mois à 3 ans : 95 % des enfants dans le monde sont infectés. Il est donc fréquent d'observer des infections dans les garderies. Cependant, l'infection est habituellement **asymptomatique chez l'adulte**. Dans les régions tempérées, les taux sont plus élevés en hiver et au début du printemps.

Le **réservoir du virus est humain** et le mode de transmission se fait essentiellement de personne-à-personne par la **voie oro-fécale**, mais également par contact avec des sécrétions des voies respiratoires, de l'eau, des aliments ou des surfaces contaminés.

D'après les experts du groupe de travail « Réutilisation des Eaux Usées Traitées » de l'AFFSET, le risque pour rotavirus est plus important par **ingestion**.

La dose infectieuse est inconnue et la période d'incubation est assez courte : 24 à 72h. Les virus sont éliminés dans les selles durant la phase aiguë de la maladie et jusqu'à 8 jours après la disparition des symptômes. On trouve en moyenne **400 à 85 000 rotavirus par litre d'eau usée**[7].

Bien qu'il n'existe aucun agent antiviral spécifique, Rotavirus est sensible, en cas d'exposition prolongée, à l'éthanol à 95 % et au formol à 2 %. Le virus peut être inactivé par une exposition à des températures supérieures à 50 °C. Rotavirus conserve sa viabilité pendant des mois lorsqu'il est entre 4 °C et 20 °C.

### ▪ Risque associé à Rotavirus

Beaucoup de données essentielles pour conclure sur le risque lié à Rotavirus sont manquantes (pas de dose infectieuse, peu de travaux sur sa résistance dans l'environnement), et il est donc difficile de dire si oui ou non il existe un risque sanitaire par ingestion lié à ce pathogène.

## L. *Cryptosporidium*

Les oocystes (forme de résistance) de *Cryptosporidium* sont des protozoaires microscopiques issus des vertébrés en général. Il en existe quatre espèces dans le genre *Cryptosporidium* : *C. baileyi*, *C. meleagridis*, *C. muris* ainsi que *Cryptosporidium parvum* (qui est particulièrement infectieux pour l'Homme). Il est de plus en plus impliqué dans des épidémies d'origines hydriques à travers le monde à cause de l'utilisation croissante d'eaux recyclées. La contamination se fait par voie fécale ou par voie orale. La maladie se traduit par de diarrhées aqueuses et sanglantes, des crampes d'estomac, des maux de tête, nausées, fièvre et vomissement. Elle peut être fatale pour les personnes fragiles (enfants, personnes âgées...) et pour les personnes fragilisées (les immunodéprimés).

La dose infectieuse est **moins de 100 oocystes**.

Les oocystes peuvent survivre et rester infectieux pendant presque 18 mois dans un environnement humide et frais. Ils résistent bien à la désinfection au chlore ou à l'ozone et les

doses nécessaires pour les éliminer peuvent engendrer des sous produits de désinfection dans les eaux.

## **M. Giardia**

*Giardia lamblia* est un protozoaire unicellulaire impliqué dans certaines infections intestinales. Les kystes rejetés à travers les selles (environ 10 millions / gramme de selle) peuvent résister dans le milieu extérieur plus de 2 mois et infecter l'Homme soit par l'eau, le sol ou les aliments.

Les principales voies de contamination de l'Homme sont : soit de personne à personne ou soit fécale orale (surtout).

La **dose infectieuse est très faible** (une dizaine de kystes suffisent). Les kystes sont dotés d'une coque très résistante, ce qui leur confère une grande résistance dans un environnement frais et humide et à la désinfection au chlore.

## **N. Naegleria Fowleri**

### ▪ Caractéristiques, pathogénicité, réservoir et épidémiologie

*Naegleria Fowleri* est un amibe vivant à l'état libre dans la nature. Les kystes, sphériques, mesurent 8-12 µm de diamètre et sont recouverts d'une paroi unique.

L'amibe est un agent pathogène qui cause la méningo-encéphalite amibienne primitive. Il entraîne l'apparition subite de céphalées, de fièvre, de nausées, de pharyngite et de congestion ou d'écoulement nasal. La progression de la maladie s'accompagne d'autres symptômes dont une léthargie, de la confusion et une raideur de la nuque. Des convulsions peuvent survenir et l'état du sujet peut se détériorer rapidement, évoluant vers le coma et la mort après 1-14 jours. Parmi les autres symptômes figurent des anomalies du goût et de l'odorat, des crises convulsives, une ataxie cérébelleuse, une raideur de la nuque et une photophobie.

C'est une espèce essentiellement tropicale, vivant dans les eaux douces et chaudes. L'infection est habituellement contractée lors d'une baignade dans une piscine, un lac ou un étang contaminé, et les symptômes apparaissent quelques jours plus tard. L'hôte est uniquement est humain.

*Naegleria* envahit le cerveau en pénétrant par la **voie nasale**. L'infection survient lors d'une baignade dans des eaux contaminées **par inhalation de kystes**. Les dangers particuliers sont en effet l'exposition des muqueuses des yeux, du nez ou de la bouche à des aérosols ou à des gouttelettes.

La période d'incubation est habituellement 3-7 jours.

La dose infectieuse est encore inconnue.

### ▪ Survie dans l'environnement

L'organisme peut se multiplier jusqu'à 46°C. Les kystes peuvent survivre durant de longues périodes dans les sédiments déposés au fonds des lacs et des rivières.

### ▪ Risque associé à *Naegleria Fowleri*

Les risques principaux de cet agent lors de l'aéropersion des eaux usées sont associés à l'exposition des muqueuses à des gouttelettes ou à des aérosols. Néanmoins, aucune étude ne donne la dose infectieuse de cet agent. Il est donc difficile d'évaluer le risque lié à ce pathogène mais une attention particulière doit lui être accordé car les kystes sont les microorganismes qui résistent le mieux aux traitements tertiaires.

Par ailleurs, l'agent est sensible aux rayons UV. Un traitement tertiaire utilisant cette technique est donc préconisé.

### **O. *Ascaris***

*A. lumbricoïdes* sont des helminthes (vers intestinaux) de forme cylindrique et mesurant environ 40 cm. La contamination de l'Homme se fait principalement par l'ingestion des œufs à travers l'eau et les aliments.

Les œufs résistent bien dans le milieu extérieur, évoluent en embryon en 3 semaines et deviennent infectieux. Selon l'OMS, plus d'un milliard de personnes infectées dans le monde par an (dont 60 000 décès). Ce sont les pays chauds et tempérés qui sont particulièrement touchés par ce ver. D'après le cycle, l'Homme s'infecte par ingestion d'aliments souillés principalement.