

Portrait québécois et évaluation du risque à la
santé de la réutilisation des eaux usées
domestiques traitées pour l'irrigation de
grandes surfaces gazonnées

INSTITUT NATIONAL
DE SANTÉ PUBLIQUE
DU QUÉBEC

Québec 

Portrait québécois et évaluation du risque à la santé de la réutilisation des eaux usées domestiques traitées pour l'irrigation de grandes surfaces gazonnées

Direction des risques biologiques,
environnementaux et occupationnels

Décembre 2008

AUTEURE

Caroline Huot, médecin résidente en santé communautaire
Université Laval

AVEC LA COLLABORATION DE

Denis Gauvin, M. Env., biologiste
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

Benoît Lévesque, M.D., M. Sc., FRCPC
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

Pierre Payment, Ph. D.
Institut national de la recherche scientifique — Institut Armand-Frappier

MISE EN PAGES

Denise Mercier, agente administrative
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

Ce document est disponible intégralement en format électronique (PDF) sur le site Web de l'Institut national de santé publique du Québec au : <http://www.inspq.qc.ca>.

Les reproductions à des fins d'étude privée ou de recherche sont autorisées en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur. Toute autre utilisation doit faire l'objet d'une autorisation du gouvernement du Québec qui détient les droits exclusifs de propriété intellectuelle sur ce document. Cette autorisation peut être obtenue en formulant une demande au guichet central du Service de la gestion des droits d'auteur des Publications du Québec à l'aide d'un formulaire en ligne accessible à l'adresse suivante : <http://www.droitauteur.gouv.qc.ca/autorisation.php>, ou en écrivant un courriel à : droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca.

Les données contenues dans le document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.

DÉPÔT LÉGAL – 2^e TRIMESTRE 2009
BIBLIOTHÈQUE ET ARCHIVES NATIONALES DU QUÉBEC
BIBLIOTHÈQUE ET ARCHIVES CANADA
ISBN : 978-2-550-56052-4 (VERSION IMPRIMÉE)
ISBN : 978-2-550-56053-1 (PDF)
©Gouvernement du Québec (2009)

RÉSUMÉ

La réutilisation des eaux usées traitées est intéressante d'un point de vue de conservation, économique et environnemental. Plusieurs usages sont possibles, l'irrigation agricole et urbaine (terrains de golf, bordures d'autoroute, cimetières, parcs) étant la plus développée. Un intérêt s'est manifesté au Québec pour ce dernier usage. Cette pratique pourrait cependant comporter certains risques à la santé de nature microbiologique (virus, bactéries, protozoaires, parasites) et c'est pourquoi plusieurs pays et organisations internationales ont choisi de l'encadrer par une réglementation ou des lignes directrices statuant entre autres sur la qualité de l'effluent utilisé, le niveau de traitement à prodiguer et les mesures de réduction de l'exposition à appliquer.

Entre autres, l'United States Environmental Protection Agency (US EPA) a publié en 2004 des lignes directrices pour la réutilisation des eaux usées. Ces dernières sont basées sur l'approche du 0 indicateur fécal, c'est-à-dire qu'elles visent l'absence d'indicateur bactérien fécal comme les coliformes totaux, fécaux ou les *Escherichia Coli* dans les eaux usées traitées réutilisées. Le critère établi est de 0 coliforme fécal/100 ml (moyenne) et ne doit jamais dépasser 14 coliformes fécaux/100 ml pour les usages intéressant les Québécois. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a, en 2006, mis à jour ses lignes directrices fondées sur une analyse de risque microbiologique et sur des données épidémiologiques. Les critères sont formulés en termes d'efficacité du traitement ou de mesure de contrôle de l'exposition utilisée. Lorsque seul un traitement est utilisé, on vise l'enlèvement de 6-7 log de rotavirus (qualité de l'effluent similaire à celle exigée en Californie soit une moyenne de < 30 coliformes totaux/100 ml) alors que lorsque l'on ajoute des mesures de contrôle de l'exposition efficaces pour enlever environ 3 log de rotavirus, on peut se permettre d'utiliser un effluent de moindre qualité (< 1000 coliformes fécaux/100 ml).

Une analyse de risque microbiologique conduite avec les données disponibles les plus représentatives de la situation québécoise en vient aux conclusions suivantes :

- Lorsque le traitement est le seul point de contrôle pour minimiser les risques à la santé liés à la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation municipale, ce dernier devrait permettre l'enlèvement de 4 à 5 log de micro-organismes (traitement de niveau tertiaire), selon le micro-organisme pathogène ou indicateur considéré. La qualité de l'effluent utilisé devrait alors correspondre à < 10 coliformes fécaux/l (< 1/100 ml).
- Lorsque des mesures de contrôle de l'exposition permettant l'enlèvement de 4 log de micro-organismes (ex. : accès interdit au public pendant et après l'irrigation, zone tampon) sont ajoutées, un traitement permettant l'enlèvement de 0 à 3 log de micro-organismes (traitement de niveau secondaire), selon le micro-organisme pathogène ou indicateur considéré, pourrait être appliqué pour obtenir une qualité d'effluent < 10⁴ coliformes fécaux/l (< 10³/100 ml).

Ces conclusions sont similaires aux recommandations formulées dans la dernière version des lignes directrices de l'OMS (2006). Elles tiennent compte du fait que le risque pour la population est non volontaire et que la population ne tire aucun bénéfice de l'exposition.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES.....	VII
INTRODUCTION.....	1
1 ASPECTS MICROBIOLOGIQUES DES EAUX USÉES ET EFFETS À LA SANTÉ.....	5
2 LIGNES DIRECTRICES INTERNATIONALES	9
2.1 Approches à l'établissement de lignes directrices.....	9
2.2 Recommandations.....	11
2.2.1 Organisation mondiale de la Santé	11
2.2.2 Lignes directrices internationales.....	15
2.2.3 États américains.....	17
2.2.4 United States Environmental Protection Agency	18
2.2.5 Australie	19
2.2.6 Pays européens et méditerranéens	21
2.2.7 Canada.....	22
3 PORTRAIT QUÉBÉCOIS	25
4 ÉVALUATION DU RISQUE.....	27
4.1 Identification du danger	28
4.2 Évaluation de l'exposition	33
4.3 Évaluation de la relation dose-réponse	36
4.4 Caractérisation du risque.....	36
5 CONCLUSION.....	43
5.1 Variabilité et incertitudes	45
6 RECOMMANDATIONS	47
RÉFÉRENCES.....	49
ANNEXE 1	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Quelques micro-organismes pathogènes présents dans les eaux usées non traitées et maladies associées chez l'humain	5
Tableau 2	Critères de qualité de l'eau et traitements recommandés par l'OMS en 1989 pour la réutilisation des eaux usées en agriculture.....	12
Tableau 3	Recommandations de l'OMS (2000) pour la révision des critères de qualité des eaux usées traitées utilisées en agriculture	13
Tableau 4	Niveaux possibles de qualité microbiologique d'eau recyclée : proposition australienne.....	16
Tableau 5	Nombre d'États américains ayant des lignes directrices ou une réglementation encadrant les différents usages	17
Tableau 6	Critères de qualité microbiologique recommandés pour les usages urbains dans différents États américains.....	18
Tableau 7	Critères de qualité de l'eau usée traitée utilisée pour l'irrigation municipale en Australie.....	21
Tableau 8	Recommandations en rapport avec la qualité microbiologique de l'eau usée réutilisée dans la région méditerranéenne.....	22
Tableau 9	Réglementation sur la qualité microbiologique des eaux usées traitées réutilisées en irrigation en Colombie-Britannique	23
Tableau 10	Critères de qualité de l'eau exigés par le MDDEP pour l'autorisation d'un projet de réutilisation des eaux usées traitées pour irrigation.....	25
Tableau 11	Micro-organismes pathogènes présents dans l'eau et importance dans l'approvisionnement en eau	29
Tableau 12	Exemples de micro-organismes pathogènes de référence retrouvés dans les excréta et leurs caractéristiques.....	30
Tableau 13	Concentration des micro-organismes pathogènes de référence et d'un indicateur bactérien dans les eaux usées non traitées	33
Tableau 14	Effet du traitement des eaux usées sur la concentration des micro-organismes pathogènes de référence et d'un pathogène indicateur.....	34
Tableau 15	Paramètres utilisés dans l'évaluation du risque de réutilisation des eaux usées à des fins d'irrigation municipale	36
Tableau 16	Relations dose-réponse pour les micro-organismes pathogènes de référence.....	36
Tableau 17	Risque pour 3 micro-organismes pathogènes de référence lors d'irrigation urbaine avec des eaux usées traitées selon 3 niveaux différents	38
Tableau 18	Calculs de l'efficacité de traitement et de la qualité de l'effluent (concentration des eaux traitées pour 3 micro-organismes pathogènes et un indicateur) nécessaires pour respecter le risque acceptable fixé	40

Tableau 19	Log de réduction de l'exposition aux micro-organismes pathogènes par différentes méthodes de contrôle de l'exposition	41
Tableau 20	Risque pour 3 micro-organismes pathogènes de référence lors d'irrigation urbaine avec des eaux usées traitées selon 3 niveaux différents + contrôle de l'exposition (restriction de l'accès au public pendant et après (1-4 h) l'irrigation + zone tampon : réduction de 4 log).....	41
Tableau 21	Critères de qualité de l'effluent et efficacité de traitement proposés pour la réutilisation des eaux usées à des fins d'irrigation municipale	43
Tableau 22	Critères de qualité de l'effluent et efficacité de traitement proposés pour la réutilisation des eaux usées à des fins d'irrigation municipale lorsqu'un contrôle de l'exposition est surajouté.....	44
Tableau 23	Recommandations pour la réutilisation des eaux usées en France (1991)	57
Tableau 24	Critères de qualité pour la réutilisation des eaux usées en Andalousie, Espagne (1994)	57
Tableau 25	Critères pour la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation en Israël.....	58
Tableau 26	Standards microbiologiques de réutilisation régionaux actuels (1989) et nationaux proposés (2002) en Italie	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Exemples de combinaisons de mesures de protection qui peuvent être utilisées pour atteindre les cibles d'enlèvement des micro-organismes pathogènes	15
Figure 2	Comparaison entre l'approche des lignes directrices actuelles et l'approche future souhaitée pour les États australiens	19
Figure 3	Étapes de l'analyse de risque proposées dans les lignes directrices australiennes	20
Figure 4	Nombre de cas déclarés selon la maladie pour les maladies entériques, Québec, 2002	32

INTRODUCTION

La réutilisation des eaux usées municipales traitées est une pratique intéressante au plan de la conservation de la ressource eau douce, qui se fait rare dans plusieurs pays du globe, à cause, entre autres, des variations climatiques, de la pollution et des pratiques de gestion sous-optimales passées et actuelles¹. De plus, l'accroissement démographique et des activités économiques contribue à faire augmenter la demande^{1,2}. Les projections effectuées pour 2025 font état d'un possible stress hydrique de modéré à élevé pour environ les deux tiers de la population mondiale^{1,2}. D'ailleurs, le recyclage de l'eau est le plus développé en terme de volume dans des régions faisant face à ce type de problèmes comme le Moyen-Orient, l'Australie et le sud-ouest des États-Unis³. Il permet d'augmenter la quantité d'eau disponible¹. Cette pratique peut aussi être bénéfique au niveau économique même dans des régions recevant beaucoup de précipitations, lorsqu'on considère les coûts engendrés par la recherche, l'approvisionnement et le traitement de nouvelles sources d'eau pour en faire une eau potable^{2,4}. De plus, le recyclage de l'eau est une alternative compétitive dans les pays où la gestion des eaux usées est un enjeu important pour des raisons environnementales ou pratiques comme l'État de la Floride, dans les régions touristiques et côtières comme la France, l'Espagne et l'Italie ainsi que dans les pays densément peuplés comme l'Allemagne et l'Angleterre³. L'irrigation de cultures ou de surfaces gazonnées avec des eaux usées peut également réduire le besoin d'utilisation de fertilisants chimiques coûteux⁵. La réutilisation des eaux usées au Canada n'est actuellement pas très développée et se pratiquerait de manière plutôt isolée³.

Plusieurs usages des eaux usées traitées sont possibles :

- urbains;
- industriels;
- agricoles;
- environnementaux et récréatifs;
- recharge de la nappe phréatique;
- augmentation des ressources en eau potable².

Les usages urbains font souvent référence à l'irrigation d'espaces gazonnés commerciaux, municipaux ou privés comme les parcs, les terrains de sport, les cours d'école, les cimetières, les terrains de golf et les bordures d'autoroutes. Ils incluent aussi les usages ornementaux, la lutte aux incendies, le contrôle de l'émission de poussières, le lavage des véhicules et l'eau de chasse des toilettes dans les édifices publics. Les usages environnementaux touchent la restauration et la création de milieux humides et l'augmentation du débit de cours d'eau. Les usages récréatifs comprennent les jeux d'eau, les sports nautiques, la pêche et la nage. La recharge de la nappe phréatique peut servir à empêcher l'infiltration d'eau salée dans les nappes côtières ou l'affaissement d'un sol. On peut l'utiliser pour entreposer ou traiter de l'eau pour un emploi ultérieur. Un usage potable est possible soit de façon directe, en utilisant l'eau à la sortie de l'usine de traitement, soit de manière indirecte, en augmentant le débit d'un cours d'eau ou la recharge d'une nappe

phréatique avec les eaux traitées². Les usages privilégiés varient d'un pays à l'autre en fonction des besoins. Globalement, l'irrigation des cultures et des surfaces gazonnées est l'usage le plus populaire, exception faite du Japon, qui a beaucoup développé les autres usages urbains non potables³. Au Québec, un intérêt s'est manifesté pour la réutilisation à des fins d'irrigation de grandes surfaces gazonnées telles que les terrains de jeux, les parcs, les cimetières, les cours d'école et les terrains de golf. Le présent rapport vise donc à analyser les risques à la santé de cet usage précis des eaux usées traitées.

Bien que l'intérêt et les bénéfices soient certainement présents, la réutilisation des eaux usées soulève une préoccupation quant aux possibles risques pour la santé des travailleurs et du public ainsi que pour l'environnement. Les risques environnementaux ne seront pas abordés dans le présent document mais pourraient être adressés par les autorités compétentes en la matière. Quant aux risques à la santé, ils ont motivé plusieurs pays industrialisés à encadrer cette pratique par des lignes directrices. Au Québec, un permis d'autorisation délivré par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) est obligatoire pour la mise en branle d'un projet de réutilisation des eaux usées municipales (MDDEP, communication personnelle). Des lignes directrices claires quant aux moyens à adopter pour minimiser les risques à la santé sont cependant nécessaires pour guider les autorités compétentes dans l'application de cette réglementation. Ces lignes directrices peuvent statuer sur les critères et les normes à respecter pour une ou plusieurs des étapes de la réutilisation qui sont en fait différents points de contrôle pour abaisser le niveau de risque⁶. On peut par exemple établir des critères pour :

- la qualité de l'effluent (fréquence de suivi) ou le traitement minimal à donner à l'affluent;
- la conception et l'opération des installations de traitement (réserves, systèmes de détection d'une défaillance et installations d'urgence);
- la distribution et l'utilisation de l'eau (type d'irrigation, signalisation des installations et de l'utilisation, distances d'irrigation des habitations et sources d'eau potable, accessibilité au terrain)⁷.

Toutes ces méthodes de réduction du risque à la santé peuvent être utilisées seules ou en combinaison. Ce rapport traitera surtout des critères de qualité de l'effluent devant être proposés dans des lignes directrices ayant comme but d'amoindrir les risques à la santé. Des critères de qualité peuvent être établis pour des paramètres chimiques et microbiologiques. Les principaux risques à la santé de la réutilisation des eaux domestiques étant d'ordre microbiologique^{5,8,9}, les critères de qualité proposés par les organisations se préoccupant de la santé et ceux qui seront explicités ici concernent les micro-organismes pathogènes.

L'objectif général du présent rapport est de déterminer les critères de qualité microbiologiques des eaux usées municipales traitées réutilisées pour l'irrigation de grandes surfaces gazonnées qui doivent être respectés afin de minimiser les risques à la santé pour la population générale. Les risques à la santé pour les travailleurs ne seront pas abordés ici. Les points suivants seront détaillés :

- les aspects microbiologiques des eaux usées en lien avec la santé humaine;
- les lignes directrices adoptées en cette matière par différents pays industrialisés;
- le portrait actuel de cette pratique au Québec et les précautions prises pour réduire les risques;
- une analyse sommaire des risques microbiologiques reliés à cette pratique et finalement;
- la formulation de recommandations en rapport avec les critères de qualité de l'eau à respecter pour réduire les risques à la santé de la réutilisation dans le contexte qui nous intéresse, sur la base des informations internationales et de l'analyse sommaire du risque réalisée.

1 ASPECTS MICROBIOLOGIQUES DES EAUX USÉES ET EFFETS À LA SANTÉ

Plusieurs micro-organismes pathogènes sont retrouvés dans les eaux usées domestiques et peuvent causer différentes maladies (tableau 1). Ils peuvent être regroupés en quatre catégories : les bactéries, les virus, les protozoaires et les helminthes.

Parmi les plus importantes bactéries pathogènes pour l'humain qui peuvent être transmises directement (consommation, baignade, aérosols) ou indirectement (contact avec de la nourriture ou une surface contaminée) par l'eau, on retrouve *Salmonella*, *Shigella*, *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli* entérohémorragique (O157:H7), *Yersinia enterocolitica*, *Campylobacter jejuni*, *Leptospira* et les mycobactéries¹⁰. Ces micro-organismes pathogènes peuvent causer des gastroentérites et d'autres affections plus graves (tableau 1)¹⁰.

Tableau 1 Quelques micro-organismes pathogènes présents dans les eaux usées non traitées et maladies associées chez l'humain

Pathogen type	Examples	Illness
Bacteria	<i>Salmonella</i>	Gastroenteritis, reactive arthritis
	<i>Campylobacter</i>	Gastroenteritis, Guillain-Barré syndrome
	Pathogenic <i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis, haemolytic uremic syndrome
	<i>Shigella</i>	Dysentery
	<i>Yersinia</i>	Gastroenteritis, septicemia
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cholera
	Atypical <i>Mycobacteria</i>	Respiratory illness (hypersensitivity pneumonitis)
	<i>Legionella</i> spp	Respiratory illness (pneumonia, Pontiac fever)
	<i>Staphylococcus aureus</i>	Skin, eye, ear infections, septicaemia
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Skin, eye, ear infections
Viruses	<i>Helicobacter pylori</i> (?)	Peptic ulcers
	Enterovirus	Gastroenteritis, respiratory illness, nervous disorders, myocarditis
	Adenovirus	Gastroenteritis, respiratory illness, eye infections
	Rotavirus	Gastroenteritis
	Norovirus	Gastroenteritis
	Hepatitis A	Infectious hepatitis
	Calicivirus	Gastroenteritis
	Astrovirus	Gastroenteritis
Protozoa	Coronavirus	Gastroenteritis
	<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenteritis
	<i>Giardia</i>	Gastroenteritis
	<i>Naegleria fowleri</i>	Amoebic meningitis
Helminths	<i>Entamoeba histolytica</i>	Amoebic dysentery
	<i>Taenia (T. saginata)</i>	Tapeworm (beef measles)
	<i>Ascaris</i>	Roundworm
	<i>Trichuris</i>	Whipworm

Source: Adapted from Feacham et al (1983), Geldreich (1990), NRC (1996), Bitton (1994).

Tiré du NRMMC et du EPHC, 2005⁹.

Environ 140 types de virus entériques ont été décrits et sont potentiellement présents dans les eaux usées. Tous les virus sont pathogènes pour l'humain et causent un large spectre de maladies et symptômes (tableau 1). Notons les enterovirus comme le poliovirus, les reovirus, les rotavirus, les adenovirus, les astrovirus, les calicivirus comme l'agent de Norwalk et les virus de l'hépatite A et E¹⁰. Les virus entériques sont présents en moins grand nombre que les bactéries dans les eaux usées et ne se multiplient pas dans cet environnement. Cependant, ils ont généralement une dose infectante faible¹⁰ et peuvent survivre plusieurs mois dans l'eau sous certaines conditions¹¹.

Les protozoaires entériques se retrouvent dans les eaux usées sous des formes qui sont très résistantes aux conditions environnementales et aux méthodes de désinfection^{10,11}. Comme les virus, ils ne se reproduisent pas en dehors de leur hôte et ont une faible dose infectante en comparaison avec les bactéries¹⁰. Les protozoaires infectant le plus souvent l'humain sont *Giardia lamblia*, *Entamoeba histolytica*, *Cryptosporidium*, *Cyclospora*, *Microsporidia* et autres¹⁰.

Les helminthes nématodes comme *Ascaris lumbricoides* et *Trichuris trichiura*, les vers plats, les cestodes comme *Taenia saginata* et *solium* et les trématodes comme *Schistosoma mansoni* sont également des micro-organismes pathogènes potentiels pour l'humain se retrouvant dans les eaux usées.

L'effet de l'exposition aux micro-organismes pathogènes cités plus haut dépend de plusieurs facteurs en lien avec l'hôte (susceptibilité et degré d'immunité), le micro-organisme pathogène et l'environnement¹⁰.

Étant donné la grande diversité des micro-organismes pathogènes présents dans l'eau et les limites des méthodes de détection (sensibilité, coût)^{12,13}, les niveaux acceptables dans l'eau usée traitée sont plutôt établis pour des micro-organismes indicateurs de contamination fécale ou de traitement^{2,11}. Les critères importants à considérer dans le choix d'un micro-organisme indicateur sont :

- L'organisme indicateur de pollution fécale doit être présent seulement s'il y a contamination fécale et il ne doit pas se reproduire en dehors de son hôte.
- La survie du micro-organisme indicateur au traitement et dans l'environnement doit être égale ou supérieure à celle du micro-organisme cible.
- La détection et l'énumération devraient être rapides et peu coûteuses.
- Le micro-organisme indicateur doit être non pathogène pour l'humain¹⁴.

Aucun indicateur disponible pour le moment ne rencontre tous ces critères, c'est pourquoi différents micro-organismes et paramètres sont utilisés comme indicateurs à des fins spécifiques^{14,15}.

Les micro-organismes indicateurs de pollution fécale et de traitement les plus utilisés jusqu'à maintenant sont les coliformes^{7,2}. Des limites de coliformes à respecter sont incluses dans la plupart des lignes directrices de réutilisation des eaux usées. La présence de coliformes

totaux serait un indicateur de risque très imprécis¹⁶. En effet, ces bactéries peuvent croître dans un réseau d'aqueduc dont l'usine de traitement est parfaitement fonctionnelle et des micro-organismes pathogènes peuvent être présents dans l'eau distribuée en l'absence de coliformes totaux¹⁶. Ils sont cependant très utiles comme indicateurs de l'efficacité du traitement de l'eau potable¹⁶ et permettent d'établir des exigences de qualité de l'eau plus conservatrices⁷. Les coliformes fécaux ou thermotolérants peuvent indiquer l'intrusion de matières fécales, et donc de micro-organismes pathogènes, dans les réseaux de distribution¹⁶. Certains coliformes fécaux ne sont pas d'origine fécale¹⁶ et on préconise maintenant l'utilisation d'*Escherichia coli* (*E. coli*) qui est le seul coliforme fécal qui soit sans équivoque toujours d'origine fécale¹⁶. Sa détection doit faire sérieusement soupçonner la présence d'une pollution fécale et, potentiellement, de micro-organismes pathogènes¹⁶. Cependant, plusieurs auteurs^{14,17,2,3,18,19} mentionnent que les coliformes ne constituent pas de bons indicateurs de la présence de virus ou de parasites (protozoaires et helminthes) qui seraient plus persistants dans l'environnement (temps de réduction de 50 % de la concentration dans les eaux de surface : coliformes = 0,9 jours, *Cryptosporidium* = jusqu'à 150 jours)¹², plus résistants à certains traitements comme la désinfection et qui ont des doses infectantes plus faibles. À cet effet, d'autres indicateurs comme les coliphages (pour les virus)^{20,10,2}, *Clostridium perfringens* (pour les virus et parasites)^{20,10,2,21}, les entérocoques (pour les virus et parasites)^{20,10} et un paramètre physicochimique comme la turbidité (pour les parasites)¹² ont été suggérés. Quelques pays ou organisations ont ajouté, en plus des critères pour les coliformes, des critères à respecter pour les parasites et les virus dans les eaux usées recyclées¹. Malgré leurs limites, on peut retenir que les coliformes fécaux et *Escherichia coli* présentent plusieurs avantages et sont les micro-organismes indicateurs les plus utilisés à l'heure actuelle.

2 LIGNES DIRECTRICES INTERNATIONALES

2.1 APPROCHES À L'ÉTABLISSEMENT DE LIGNES DIRECTRICES

Dans le but de minimiser les possibles risques à la santé de la réutilisation des eaux usées, plusieurs pays ont instauré des lignes directrices ou une réglementation pour l'encadrer. La conformité à des lignes directrices se fait sur une base volontaire et n'est pas exécutoire légalement contrairement à une réglementation^{2,7}. Il existe des arguments pour et contre chacune des 2 méthodes. Lorsque les risques à la santé sont jugés élevés (par exemple par une pauvre qualité de l'affluent utilisé), une réglementation peut aider à assurer une protection adéquate pour la santé et l'environnement²². En instaurant des normes fixes encadrant la pratique, elle peut empêcher la délégation de la responsabilité des risques des décideurs aux entrepreneurs des projets de réutilisation²². Cependant, une réglementation peut quelquefois constituer un frein à l'innovation et à l'adaptation des projets aux conditions locales²². Elle peut aussi entraîner des coûts de réutilisation qui n'auraient pas été nécessaires dans certaines situations²². De plus, le renforcement de cette réglementation est nécessaire et demande une volonté institutionnelle, du personnel qualifié et entraîne des coûts supplémentaires. Selon certains auteurs, les lignes directrices seraient plus appropriées lorsque les risques de la réutilisation sont faibles et qu'une bonne confiance existe dans les procédures interinstitutionnelles et les moyens financiers et techniques disponibles pour abaisser les risques²².

Tel que détaillé plus haut, plusieurs usages sont possibles et ils ne comportent pas tous le même niveau d'exposition potentiel du public et des travailleurs. Tous ces usages sont donc regroupés selon le niveau de contact qu'ils peuvent entraîner et différentes exigences de qualité sont ensuite établies en fonction du degré d'exposition anticipé. Les critères les plus stricts correspondent évidemment aux usages à plus grand risque d'exposition pour un plus grand nombre de personnes. Par exemple, en rapport avec l'usage pour l'irrigation en milieu urbain, les catégories « aire à accès restreint/limité » et « accès non restreint/illimité » sont utilisées selon le degré d'exposition possible. Il faut cependant porter attention au fait que les usages et les personnes exposées pour ces 2 catégories varient selon les lignes directrices considérées. Souvent, les parcs, terrains de jeux, de sport et cours d'école sont étiquetés à accès illimité alors que les golfs, cimetières et bordures d'autoroute sont à accès limité. L'accès limité ou restreint ne signifie pas toujours l'impossibilité d'accéder pour le public, mais plutôt un achalandage moindre de ces lieux.

En plus des risques à la santé et des risques environnementaux, des considérations économiques, politiques et sociales influencent le choix des lignes directrices adoptées par une organisation ou un pays^{22,23}. La diversité de toutes ces considérations à travers le monde a pour résultat l'établissement de balises à l'utilisation des eaux usées qui diffèrent grandement d'un pays à l'autre.

Trois approches peuvent être utilisées pour établir des lignes directrices. Elles sont soutenues par des objectifs différents. La première vise l'absence de micro-organisme indicateur bactérien fécal comme les coliformes totaux, fécaux ou les *E. Coli*. Certains États américains ainsi que l'US Environmental Protection Agency (US EPA) et Israël (annexe,

tableau 25) visent, pour la plupart des usages, le 0 indicateur fécal dans leurs lignes directrices de réutilisation des eaux usées¹⁷. Cet objectif du **0 indicateur fécal** génère des coûts importants qui peuvent être justifiés dans un pays industrialisé où le niveau endémique d'infection est bas¹⁷. Ces dépenses sont cependant moins appropriées dans les pays disposant de peu de ressources en prévention dans le domaine de la santé, où la prévalence des infections entériques, toutes causes confondues, est élevée et où la transmission est davantage le résultat de pauvres mesures d'hygiène que de la réutilisation des eaux usées¹⁷.

L'objectif de la seconde approche est de permettre l'utilisation d'une eau d'une qualité telle que le recyclage n'entraînera pas un excès de cas d'infections pouvant être causées par des micro-organismes pathogènes hydriques¹⁷. Elle peut aussi viser à abaisser le risque actuel afin que les bénéfices du recyclage de l'eau surpassent les risques²². Les critères de qualité de l'eau à respecter sont alors basés sur les **données des études épidémiologiques**²². Il s'agit de l'approche qui a été privilégiée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) en 1989 et par certains pays méditerranéens et de l'Union européenne comme la France (annexe, tableau 23). Les études épidémiologiques ont l'avantage de prendre en considération des conditions locales particulières comme un niveau d'immunité populationnel élevé²². Cependant, la spécificité temporelle et géographique des résultats peut rendre la généralisation à d'autres populations complexe¹⁷. Le manque de sensibilité à détecter un excès de maladie (ou une infection sans maladie) est aussi souvent reproché à ces études^{17,22}. Elles seraient particulièrement utiles dans les endroits où le niveau endémique d'infections entériques est élevé et donc détectable avec les méthodes épidémiologiques¹⁷.

La troisième approche utilise la méthode de l'analyse quantitative de risque microbiologique (*Quantitative microbial risk assessment* [QMRA]). À l'aide d'un modèle permettant d'estimer le risque encouru pour un micro-organisme pathogène cible par l'exposition à une eau de qualité donnée, les utilisateurs peuvent ensuite déterminer si le contrôle doit être resserré afin de ne pas courir un niveau de risque plus élevé que celui qu'ils auront identifié comme étant acceptable ou tolérable¹⁷. La méthode d'évaluation du risque est présentée plus en détail au point 5. Un modèle d'analyse de risque microbiologique a été proposé par l'OMS pour établir des critères de qualité de l'eau potable et a été repris par l'Australie dans le but de formuler ses critères de réutilisation des eaux usées traitées. Cette approche, combinée aux évidences provenant des études épidémiologiques, a aussi été utilisée pour formuler les nouvelles recommandations de réutilisation des eaux usées de l'OMS parues en 2006. L'analyse de risque microbiologique est particulièrement utile dans les endroits où le niveau endémique d'infections est bas, où le risque d'infection est faible²² mais où une surveillance fréquente des micro-organismes pathogènes dans les eaux usées donne accès à une base de données permettant d'évaluer l'exposition de la population¹⁷. Elle peut aussi permettre d'évaluer des risques auxquels une population n'est pas encore exposée, dans une optique de prévention¹⁷. Cependant, elle dépend de données obtenues par expérimentation avec une souche particulière d'un micro-organisme pathogène chez un petit nombre de volontaires dont l'état d'immunité et de vulnérabilité n'est peut-être pas représentatif de toute la population¹⁷. Le risque infectieux aux faibles doses rencontrées est obtenu par extrapolation à partir de modèles mathématiques construits avec des données obtenues par expérimentation avec des doses plus élevées¹⁷. Finalement, le niveau de risque acceptable fixé est subjectif et dépend entre autres des circonstances économiques, des bénéfices

reliés à la réutilisation des eaux usées, du niveau endémique d'infections et de l'importance des autres routes de transmission (personne à personne, vecteur, nourriture, sol, air, objet inerte)^{17,22}.

2.2 RECOMMANDATIONS

2.2.1 Organisation mondiale de la Santé

L'Organisation mondiale de la Santé a publié, en 1989, le rapport intitulé *Health guidelines for the use of wastewater for agriculture and aquaculture*. Le principal objectif poursuivi par la publication de ces lignes directrices est de permettre une pratique de réutilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture qui soit sécuritaire pour la santé des travailleurs et du public⁵. Les eaux usées auxquelles on réfère sont composées des effluents domestiques et municipaux et ne contiennent pas une quantité importante de rejets industriels, ces derniers nécessitant l'établissement de critères de contamination chimique n'étant pas explicités dans ce document⁵. L'OMS souligne qu'il existe différents moyens pour abaisser les risques à la santé de cette pratique et propose l'instauration de :

- critères de qualité microbiologique de l'effluent ou de traitement minimal à prodiguer;
- normes d'utilisation sur les cultures permises, la technique d'irrigation et le contrôle des expositions humaines, en établissant des zones tampons d'irrigation par exemple.

Les critères de qualité microbiologiques qu'ils ont énoncés seront détaillés ici. Ces derniers ont été fixés sur la base d'information apportée par les études épidémiologiques, conduites en majorité dans des pays en voie de développement et portant sur la réutilisation d'eaux usées non traitées ou peu traitées pour irriguer des cultures⁷. Ces critères prennent en considération le fait qu'une eau usée non traitée contient une quantité d'au moins 30 micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires, helminthes) d'importance d'un point de vue de santé publique⁵. Le principal risque identifié par l'OMS dans les pays où ont été conduites ces études est celui de l'infection par les helminthes⁷. Les nématodes servent donc de principal organisme pathogène indicateur et une limite de bactéries coliformes fécales a été ajoutée lors de contacts possibles du public avec l'eau ou le matériel arrosé. Les critères de qualité proposés sont décrits au tableau 2.

Les critères en lien avec les usages qui nous intéressent sont les suivantes :

- ≤ 1 oeuf de nématode intestinal/l (moyenne arithmétique) pour une irrigation dans une aire à accès limité (catégorie B : pâturage et arbres où seuls les travailleurs sont considérés exposés) et illimité (catégorie A : irrigation de terrains de sport et de parcs publics où les personnes exposées sont les travailleurs et le public). Ce critère de qualité représenterait une diminution d'au moins 2 log ($> 99\%$) à partir des eaux usées⁵.
- ≤ 1000 coliformes fécaux/100 ml (moyenne géométrique) pour l'irrigation d'une aire à accès illimité (catégorie A). Une limite plus stricte 200 coliformes fécaux/100 ml est proposée pour les surfaces gazonnées comme les terrains d'hôtel où le public peut être en contact direct avec l'eau irriguée.

Il s'agit de critères pour la construction des installations de traitement et non de critères de surveillance de la qualité⁷.

Tableau 2 Critères de qualité de l'eau et traitements recommandés par l'OMS en 1989 pour la réutilisation des eaux usées en agriculture

Category	Reuse conditions	Exposed group	Intestinal nematodes ^b (arithmetic mean no. of eggs per litre ^c)	Faecal coliforms (geometric mean no. per 100ml ^c)	Wastewater treatment expected to achieve the required microbiological guideline
A	Irrigation of crops likely to be eaten uncooked, sports fields, public parks ^d	Workers, consumers, public	≤ 1	≤ 1000	A series of stabilization ponds designed to achieve the microbiological quality indicated, or equivalent treatment
B	Irrigation of cereal crops, industrial crops, fodder crops, pasture and trees ^e	Workers	≤ 1	No standard recommended	Retention in stabilization ponds for 8–10 days or equivalent helminth and faecal coliform removal
C	Localized irrigation of crops in category B if exposure to workers and the public does not occur	None	Not applicable	Not applicable	Pretreatment as required by irrigation technology but not less than primary sedimentation

^a In specific cases, local epidemiological, sociocultural and environmental factors should be taken into account and the guidelines modified accordingly.

^b *Ascaris* and *Trichuris* species and hookworms.

^c During the irrigation period.

^d A more stringent guideline limit (≤ 200 faecal coliforms/100 ml) is appropriate for public lawns, such as hotel lawns, with which the public may come into direct contact.

^e In the case of fruit trees, irrigation should cease two weeks before fruit is picked, and no fruit should be picked off the ground. Sprinkler irrigation should not be used.

Tiré de Blumenthal *et al.*, 2000¹⁷.

Une proposition pour la révision de ces lignes directrices a été faite en 2000¹⁷. Pour ce faire, les auteurs de cette proposition ont choisi de combiner les données des études épidémiologiques et microbiologiques avec une analyse des risques microbiologiques¹⁷. Le détail des évidences considérées est décrit dans leur publication. Les recommandations révisées sont les suivantes (tableau 3) :

- En ce qui concerne l'irrigation des aires à accès non restreint (catégorie A), le critère des coliformes fécaux proposé est inchangé (≤ 10³ coliformes fécaux/100 ml). Le critère des nématodes est abaissé (de ≤ 1 oeuf de nématode/l à 0,1 oeuf de nématode intestinal/l)

pour prendre en considération les climats qui favorisent la survie comme des températures plus basses et des sols plus humides.

- Pour l'irrigation des aires à accès limité (catégorie B), 3 sous-catégories ont été créées pour tenir compte des méthodes d'irrigation plus à risque (inondation des terrains, catégorie B2) et de la susceptibilité particulière des enfants de moins de 15 ans (catégorie B3). Pour les coliformes fécaux, une limite de 10^5 coliformes fécaux/100 ml est ajoutée à la catégorie B1, étant donné qu'une eau de qualité inférieure pourrait être reliée à un excès d'infections virales. Les exigences sont plus serrées à 10^3 coliformes fécaux/100 ml pour les catégories B2 (inondation) et B3 (enfants). La limite des nématodes est abaissée à 0,1 œuf/l pour la catégorie où des enfants pourraient être exposés (B3).

Tableau 3 Recommandations de l'OMS (2000) pour la révision des critères de qualité des eaux usées traitées utilisées en agriculture

Category	Reuse conditions	Exposed group	Irrigation technique	Intestinal nematodes ^b (arithmetic mean no. of eggs per litre ^c)	Faecal coliforms (geometric mean no. per 100 ml ^d)	Wastewater treatment expected to achieve required microbiological quality
A	Unrestricted irrigation					
	A1 For vegetable and salad crops eaten uncooked, sports fields, public parks ^e	Workers, consumers, public	Any	$\leq 0.1^f$	$\leq 10^3$	Well-designed series of waste stabilization ponds (WSP), sequential batch-fed wastewater storage and treatment reservoirs (WSTR) or equivalent treatment (e.g., conventional secondary treatment supplemented by either polishing ponds or filtration and disinfection)
B	Restricted irrigation					
	Cereal crops, industrial crops, fodder crops, pasture and trees ^g	B1 Workers (but no children <15 years), nearby communities	Spray or sprinkler	≤ 1	$\leq 10^5$	Retention in WSP series including one maturation pond or in sequential WSTR or equivalent treatment (e.g., conventional secondary treatment supplemented by either polishing ponds or filtration)
		B2 as B1	Flood/furrow	≤ 1	$\leq 10^3$	As for Category A
		B3 Workers including children <15 years, nearby communities	Any	≤ 0.1	$\leq 10^3$	As for Category A
C	Localized irrigation of crops in category B if exposure of workers and the public does not occur	None	Trickle, drip or bubbler	Not applicable	Not applicable	Pretreatment as required by the irrigation technology, but not less than primary sedimentation

^a In specific cases, local epidemiological, sociocultural and environmental factors should be taken into account and the guidelines modified accordingly.

^b *Ascaris* and *Trichuris* species and hookworms; the guideline limit is also intended to protect against risks from parasitic protozoa.

^c During the irrigation season (if the wastewater is treated in WSP or WSTR which have been designed to achieve these egg numbers, then routine effluent quality monitoring is not required).

^d During the irrigation season (faecal coliform counts should preferably be done weekly, but at least monthly).

^e A more stringent guideline limit (≤ 200 faecal coliforms/100 ml) is appropriate for public lawns, such as hotel lawns, with which the public may come into direct contact.

^f This guideline limit can be increased to ≤ 1 egg/l if (i) conditions are hot and dry and surface irrigation is not used or (ii) if wastewater treatment is supplemented with anthelmintic chemotherapy campaigns in areas of wastewater reuse.

^g In the case of fruit trees, irrigation should stop two weeks before fruit is picked, and no fruit should be picked off the ground. Spray/sprinkler irrigation should not be used.

Tiré de Blumenthal *et al.*, 2000¹⁷.

D'après les évidences recueillies, les auteurs ne croient pas nécessaire d'ajouter des critères de contamination virale ou de protozoaires (*Giardia*, *Cryptosporidium*). Les critères bactériens et de nématodes actuels n'entraîneraient pas un excès de risque ou un risque inacceptable d'infection virale ou par des protozoaires. Cependant, concernant ces derniers, les auteurs ajoutent que peu d'études sont disponibles sur la transmission par la réutilisation des eaux usées et que d'autres routes de transmission (ingestion d'eau et d'aliments contaminés) ainsi qu'une hygiène sous-optimale sont probablement les modes de transmission prépondérants, surtout dans les pays en voie de développement.

L'Organisation mondiale de la Santé a récemment (2006) mis à jour ses recommandations concernant la réutilisation des eaux usées²⁴. Ces lignes directrices se basent sur les évidences épidémiologiques et sur une analyse de risque microbiologique. Le fardeau tolérable de maladie a été fixé à 10^{-6} *disability adjusted life years* (DALY) (années de vie ajustées sur l'incapacité), comme dans leurs recommandations sur l'eau potable. L'utilisation du DALY permet de prendre en considération les impacts sur la mortalité et sur la morbidité, la sévérité et la durée d'un effet pour un même agent pathogène²⁵. Chaque effet d'un agent est classé en sévérité sur une échelle de 0 à 1 (0 représentant un bon état de santé et 1 le décès) puis multiplié par la durée en années de l'effet et par le nombre de personnes affectées. On peut ensuite additionner les valeurs des différents effets (de morbidité et de mortalité) pour un même agent pathogène. Le DALY fournit aussi une mesure commune pour comparer les différents risques à la santé (ex. : chimiques et microbiologiques) reliés à la réutilisation des eaux usées²⁵. Trois micro-organismes pathogènes de référence (rotavirus, *Campylobacter* et *Cryptosporidium*) ont été choisis. En utilisant le DALY par cas de maladie et le ratio maladie/infection lié à ces micro-organismes pathogènes, un risque tolérable d'infection a été calculé pour chacun de ces 3 micro-organismes pathogènes. Une évaluation du risque d'infection avec la méthode Monte Carlo a permis d'estimer le risque d'infection par ces micro-organismes pathogènes selon la qualité de l'affluent utilisé. La comparaison entre ce risque d'infection estimé et le risque tolérable d'infection a permis de déterminer la réduction requise dans l'affluent utilisé pour chacun des micro-organismes pathogènes (enlèvement des micro-organismes pathogènes). Pour les usages qui nous intéressent ici, un niveau d'enlèvement de 6 à 7 log est proposé. Ce niveau est basé sur le risque à la santé le plus important attribué au rotavirus et est considéré protecteur pour les bactéries et les protozoaires. Le niveau d'enlèvement des micro-organismes pathogènes associé à différentes mesures de protection ou de réduction du risque (traitement, technique d'irrigation et utilisation) est explicité dans le document. Il est alors possible de choisir une mesure ou une combinaison de ces mesures pour assurer une réduction en micro-organismes pathogènes de 6 à 7 log (figure 1).

L'option E qui utilise seulement le traitement de l'eau comme mesure de protection pour atteindre 6-7 log d'enlèvement des micro-organismes pathogènes correspondrait à un niveau de traitement qui permet d'obtenir une eau de qualité similaire à celle exigée en Californie (voir critères énoncés au point 1.2.3). L'option A qui combine plusieurs mesures (traitement, restriction de l'accès et lavage des produits de consommation) propose plutôt l'utilisation d'un traitement permettant d'obtenir un effluent respectant les premières recommandations de l'OMS⁵, soit 1000 coliformes fécaux/100 ml.

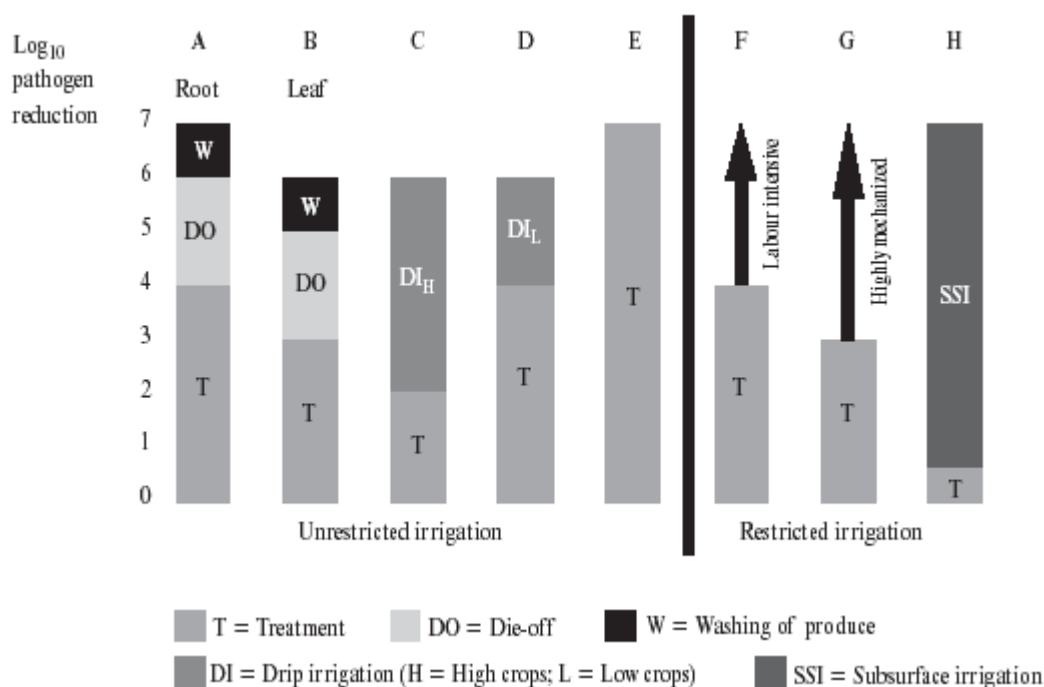


Figure 1 Exemples de combinaisons de mesures de protection qui peuvent être utilisées pour atteindre les cibles d'enlèvement des micro-organismes pathogènes

Tiré de WHO, 2002²⁴.

Ces nouvelles lignes directrices proposent donc des cibles de réduction en micro-organismes pathogènes selon l'utilisation projetée plutôt qu'un niveau de traitement et une qualité de l'effluent à respecter. Un éventail de méthodes ou combinaisons de méthodes de réduction du risque est proposé pour parvenir à atteindre ces cibles de réduction en micro-organismes pathogènes. Le traitement de l'eau usée est l'une de ces nombreuses méthodes. Un niveau de traitement et une qualité de l'effluent similaires à ceux proposés dans leurs premières lignes directrices restent toujours un choix possible (option A) mais doivent être combinés à d'autres mesures de réduction du risque. En ce qui concerne le risque associé aux nématodes pour les usages qui nous intéressent, la recommandation reste inchangée par rapport aux recommandations de 1989. Elle est toujours basée sur les évidences épidémiologiques, les données étant considérées insuffisantes actuellement pour procéder à une analyse de risque microbiologique.

2.2.2 Lignes directrices internationales

Une uniformisation internationale des lignes directrices présente certains avantages :

- facilitation des échanges commerciaux dans le contexte de la globalisation des marchés;
- attribution des ressources nationales et locales à la gestion du risque plutôt qu'à l'établissement de normes ou l'étude des projets au cas par cas;
- coordination internationale des efforts de recherche dans le domaine;

- confiance accrue de la part du public dans les projets de réutilisation des eaux usées²².

Dans cet ordre d'idée, un groupe d'experts provenant entre autres des États-Unis et de l'Australie ont adapté une suggestion de lignes directrices australiennes pour en faire une proposition de standards internationaux (voir tableau 4).

Tableau 4 Niveaux possibles de qualité microbiologique d'eau recyclée : proposition australienne

Niveau	Description ^a	Coliformes fécaux/100 ml
5 étoiles	Potable	
A+ 4 étoiles	Accès illimité	< 1
A 3 ^{1/2} étoiles	Contact élevé	< 10
B 3 étoiles	Contact moyen	< 100
C 2 étoiles	Contact faible	< 1000
D 1 étoile	Accès limité	< 10 000

a Pour les usages qui nous intéressent (irrigation de grandes surfaces gazonnées municipales) :
 accès illimité : permis
 contact élevé : permis
 contact moyen : permis
 contact faible : permis, mais 4 heures après l'arrosage
 accès limité : non permis

Adapté de Anderson *et al.*, 2001²².

La proposition contient aussi le traitement suggéré pour obtenir la qualité d'eau désirée²⁶. Selon les conditions locales économiques, sociales et autres dictant le risque tolérable, un pays pourrait alors par la suite déterminer le niveau de qualité d'eau exigé pour chacun des usages permis²².

Certaines limites aux propositions internationales actuelles (OMS, Anderson *et al.*) ont été soulevées²⁶. L'utilisation des coliformes fécaux comme indicateur pourrait être limitée en climat tropical par leur persistance et la croissance en milieu aquatique^{26,12}. En plus, tel que mentionné plus haut, il n'existe pas de relation entre cet indicateur et les parasites et virus dans les eaux usées. La sensibilité aux traitements des coliformes fécaux n'est pas directement corrélée à l'enlèvement des autres micro-organismes pathogènes²⁶. Aussi, la quantité de micro-organismes pathogènes pouvant être de 10 à 1000 fois plus élevée dans les eaux usées des pays en voie de développement en comparaison avec les pays développés, un traitement plus élaboré sera nécessaire pour atteindre le même niveau de qualité de l'eau chez les premiers par rapport aux deuxièmes²⁶. Il est donc difficile de proposer un type de traitement pouvant permettre d'obtenir une certaine qualité d'effluent dans des lignes directrices internationales. Finalement, malgré que la morbidité liée aux nématodes, micro-organismes pathogènes sur lesquels sont principalement basées les recommandations de l'OMS, puisse être élevée dans certaines régions du monde, la morbidité et la mortalité reliées aux virus et aux bactéries dans l'eau sont tout aussi, sinon plus importantes²⁶.

2.2.3 États américains

Il n'existe pas de réglementation fédérale encadrant la pratique de réutilisation des eaux usées traitées aux États-Unis^{2,27}. Plusieurs États ont cependant statué sur des lignes directrices ou adopté une réglementation couvrant plusieurs mais pas tous les usages des eaux usées. En 2002, 25 États avaient une réglementation et 16 avaient des lignes directrices sur le sujet². Certaines ont pour objectif d'encourager la réutilisation alors que d'autres visent simplement la disposition sécuritaire des effluents^{2,27}. Les autres États peuvent accepter des projets en les évaluant cas par cas^{2,27}. L'irrigation en milieu urbain ou en agriculture sont les usages qui sont le plus fréquemment discutés dans ces recommandations (tableau 5)².

Tableau 5 Nombre d'États américains ayant des lignes directrices ou une réglementation encadrant les différents usages

Type de réutilisation	Nombre d'États
Urbain accès non restreint	28
Irrigation	28
Toilette	10
Lutte incendies	9
Construction	9
Aménagements paysagers	11
Nettoyage rues	6
Urbain accès restreint	34
Agriculture (nourriture humains)	21
Agriculture (autre)	40
Récréatif accès non restreint	7
Récréatif accès restreint	9
Environnemental (milieux humides)	3
Industriel	9
Recharge de la nappe phréatique (non potable)	5
Potable indirect (recharge source eau potable)	5

Adapté de US EPA et USAID, 2004².

Quelques États dont la Californie, la Floride, l'Arizona et le Texas ont établi des critères de qualité pour plusieurs usages depuis quelques années déjà^{7,27}. La Californie est pionnière dans le domaine, sa première réglementation encadrant la réutilisation des eaux usées datant de 1918⁷. Comme on peut le constater en examinant le tableau 6, les critères de qualité microbiologique à respecter pour les usages urbains à accès non restreint (irrigation de parcs, terrains de sport ou de jeux, cours d'école) ou restreint (terrains de golf, cimetières, bordures d'autoroute) varient d'un état à l'autre. L'approche du 0 indicateur fécal est fréquente.

Tableau 6 Critères de qualité microbiologique recommandés pour les usages urbains dans différents États américains

Catégorie d'exposition		Arizona Coliformes fécaux (ufc/100 ml)	Californie Coliformes totaux (ufc/100 ml)	Floride Coliformes fécaux (ufc/100 ml)	Texas Coliformes fécaux (ufc/100 ml)
Usages urbains à accès <i>non</i> restreint	Moyenne	Non détectable	2,2	75 % échantillons sous seuil détection	20
	Maximum	23	23 (sur 30 j)	25	75
Usages urbains à accès restreint	Moyenne	200	23	75 % échantillons sous seuil détection	200
	Maximum	800	240 (sur 30 j)	25	800

Adapté de US EPA et USAID, 2004².

Aucun état n'a établi de critères pour d'autres micro-organismes pathogènes, mais la Floride et la Californie demandent la surveillance des protozoaires *Giardia* et *Cryptosporidium* sous certaines conditions^{2,7}. Différentes exigences par rapport aux paramètres physicochimiques, au traitement, à la fiabilité du traitement, à la surveillance, à la capacité de réserve en eaux usées des plans de traitement, au débit d'irrigation et aux distances minimales d'irrigation des habitations, routes et sources d'eau potable sont aussi souvent énoncées.

2.2.4 United States Environmental Protection Agency

Cet organisme propose de l'information et des lignes directrices pour la réutilisation des eaux usées aux États-Unis. Ces recommandations sont transmises à titre indicatif seulement, sans obligation légale, aux États qui voudraient implanter des programmes ou une réglementation de réutilisation des eaux usées et qui ne possèdent pas déjà leur propre cadre². Elles sont basées sur l'expérience de réutilisation aux États-Unis, les résultats des recherches et des projets pilotes, les recommandations des différents États et la faisabilité technique². Les lignes directrices actuelles, datant de 2004, suggèrent un mode de traitement, des critères de qualité microbiologique, physicochimique et esthétique de l'eau, une fréquence et des paramètres de surveillance (monitoring) ainsi qu'une zone tampon, et ce, pour les différents usages possibles des eaux usées. Des critères en rapport avec les installations d'urgence et la signalisation des installations sont aussi inclus. En ce qui concerne le critère de qualité microbiologique pour les usages urbains comme l'irrigation de tous les types de terrains (parcs, terrains de golf, cimetières), il est de **0 coliforme fécal/100 ml** (moyenne) et ne doit jamais dépasser **14 coliformes fécaux/100 ml**². Sous certaines conditions très spéciales (accès interdit, restreint ou non fréquent, ex. : site de sylviculture), il pourrait être accepté de maintenir une moyenne de 200 coliformes fécaux/100 ml sans jamais dépasser 800 coliformes fécaux/100 ml. Cet organisme a donc adopté l'approche du 0 indicateur fécal.

En ce qui concerne les virus, il est mentionné que leur présence dans les eaux usées est une préoccupation. Cependant, on explique que des limites ne sont pas spécifiées parce que leur identification et leur quantification sont techniquement difficiles et coûteuses, surtout

dans un contexte de surveillance. De plus, les auteurs de ces recommandations affirment que les effets à la santé de faibles quantités de virus ne font pas consensus et que des cas d'infection virale en lien avec la réutilisation des eaux usées n'auraient pas été rapportés aux États-Unis^{2,7}. Une caractérisation microbiologique complète, sans plus de précision sur les micro-organismes pathogènes recherchés, doit par contre être effectuée avant le début des activités d'un point de recyclage.

2.2.5 Australie

Les périodes de sécheresse ainsi que le regroupement de la population dans les grands centres urbains ont augmenté les pressions sur la ressource eau en Australie⁹. L'obligation de la gérer de manière efficiente et les limites des lignes directrices nationales existantes sur la réutilisation des eaux usées ont mené l'Environmental Protection and Heritage Council et le Natural Resource Management Ministerial Council à développer de nouvelles lignes directrices nationales, publiées en octobre 2005 pour consultation publique. Ces lignes directrices proposent un cadre de gestion du risque basé sur :

- l'analyse des différents risques inhérents à la réutilisation des eaux usées;
- le contrôle aux étapes du recyclage où les risques sont les plus élevés (*hazard analysis and critical control point*);
- la surveillance des paramètres et le suivi du risque²⁸.

Ce cadre est emprunté aux plus récentes recommandations sur la qualité de l'eau potable de l'OMS (2004) et de l'Australie (2004)⁹. Le fait que les différents États et territoires australiens aient jusqu'à maintenant publié leurs propres recommandations, qui diffèrent entre elles, entraîne des inconsistances⁹ et un souhait d'adhésion à l'approche nationale proposée est formulé par les auteurs (figure 2)²⁸.

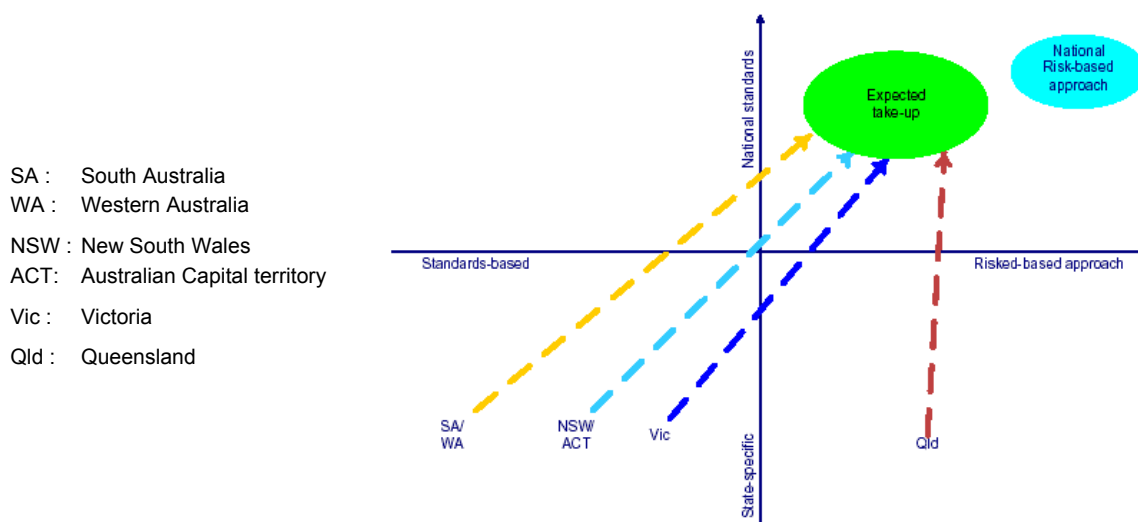


Figure 2 Comparaison entre l'approche des lignes directrices actuelles et l'approche future souhaitée pour les États australiens

Tiré de Marsden Jacob Associates, 2005²⁸.

Ces recommandations considèrent les risques à la santé et environnementaux. Pour ce qui est des risques à la santé, il est mentionné que des cibles-santé, correspondant le plus souvent à des critères de qualité microbiologique, doivent être établies en fonction du risque que l'on considère acceptable ou tolérable. Dans les lignes directrices australiennes, ce risque a été fixé à 10^{-6} DALY, en se basant sur les dernières recommandations sur la qualité de l'eau potable de l'OMS⁹. Une analyse de risque microbiologique en 4 étapes (figure 3) doit être conduite pour quantifier le risque relié à la qualité de l'affluent utilisé. Pour ce faire, des micro-organismes pathogènes de référence et des valeurs des paramètres d'exposition et de la relation dose-réponse sont proposés. En comparant le risque calculé avec le risque tolérable préalablement décrit (10^{-6} DALY), des mesures de contrôle du risque peuvent alors être choisies (et combinées) selon leur pouvoir d'abaissement du risque, afin de parvenir à un risque moindre que celui de 10^{-6} DALY.

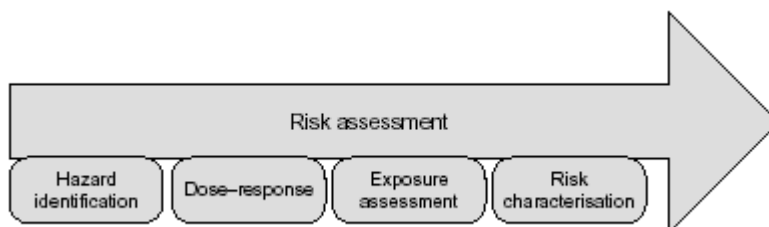


Figure 3 Étapes de l'analyse de risque proposées dans les lignes directrices australiennes

Tiré du NRMCC et du EPHC, 2005⁹.

Les mesures de contrôle du risque proposées sont la réduction de la concentration des micro-organismes pathogènes dans l'eau en prévenant leur introduction à la source ou en traitant l'eau et la réduction de l'exposition des personnes en contrôlant l'utilisation (types d'usage, technique d'irrigation, signalisation, etc.).

À l'aide de l'approche proposée, chaque État peut bâtir ses lignes directrices contenant les mesures de contrôle ou de réduction du risque désirées, en respectant ses particularités. Des limites de quantité de micro-organismes pathogènes présents dans les eaux traitées sont tout de même énoncées dans ces lignes directrices, pour différents usages et en fonction des autres mesures de réduction des risques appliquées. C'est ainsi que pour le même usage, différentes quantités de *E. coli* sont tolérées, selon le niveau de traitement prodigué et la présence de mesures de réduction de l'exposition. Pour les usages municipaux d'irrigation (parcs, terrains de sport et de golfs), on pourra tolérer < 10 *E.coli*/100 ml avec un traitement secondaire^a suivi d'une coagulation, d'une filtration et d'une désinfection, si aucune mesure de contrôle de l'exposition n'est appliquée. Avec un traitement secondaire et une désinfection combinés à plusieurs mesures de réduction de l'exposition (pas d'accès pendant et 4 heures après l'irrigation, zone tampon de 25-30 mètres du public et types d'irrigation spécifiques), la limite suivante est proposée : < 100 *E. coli*/100 ml.

^a Traitement secondaire : procédés chimiques (désinfection, adsorption, précipitation) ou biologiques (activité microbienne qui permet la dégradation de la matière organique et le retrait de nutriments)¹⁰.

Pour un traitement primaire^b ou secondaire avec une rétention en bassin pendant plus de 60 ou 30 jours respectivement, combinés aux mêmes mesures de limite de l'exposition décrites plus haut, le critère est assoupli à < 1 000 *E. coli*/100 ml. Des limites sont aussi énoncées pour les paramètres physicochimiques.

Tableau 7 Critères de qualité de l'eau usée traitée utilisée pour l'irrigation municipale en Australie

Usages	Traitement	Mesures de réduction de l'exposition	<i>E. coli</i> (ufc/100 ml)
Irrigation municipale (parcs, terrains de sport, golfs)	Secondaire + coagulation, filtration, désinfection	Aucune	< 10
	Secondaire + désinfection	Multiples (voir texte)	< 100
	Primaire + rétention 60 j ou secondaire + rétention 30 j	Multiples idem (voir texte)	< 1 000

Adapté de NRMCC et EPHC, 2005⁹.

2.2.6 Pays européens et méditerranéens

Plusieurs incitatifs au recyclage décrits plus hauts sont retrouvés dans la région méditerranéenne. Ces facteurs sont cependant inégalement répartis dans la région, les populations du sud du bassin (Nord de l'Afrique) et du Moyen-Orient étant plus affectées que les pays européens²⁹.

Le recyclage des eaux usées pour l'irrigation agricole ou autre est en effet une pratique fréquente dans la plupart des pays méditerranéens²⁹. L'irrigation des terrains de golf est l'usage qui connaît la plus grande augmentation de popularité en Europe¹. Cependant, seulement quelques pays méditerranéens dont la France, l'Italie, la Jordanie, la Tunisie, Israël et Chypre ont des lignes directrices nationales^{29,30}. Des recommandations régionales existent en Espagne³⁰. De plus, pour des raisons historiques, économiques et sociales, la gestion de cette pratique diffère beaucoup d'un pays à l'autre et parfois à l'intérieur d'un même pays, comme en Italie ou en Espagne²⁹. On peut toutefois distinguer 3 groupes de pays selon l'origine de l'inspiration de leurs lignes directrices :

- aucune ligne directrice ou réglementation;
- critères de qualité basés sur ceux de l'OMS comme en France, en Tunisie, dans certaines régions de l'Espagne et en Italie (Sicile);
- standards se rapprochant de ceux de certains États américains et de l'US EPA par exemple en Israël, Chypre et le reste de l'Italie²⁹.

Les recommandations pour la réutilisation des eaux usées en France, dans une région de l'Espagne, en Israël et en Italie sont présentées à l'annexe 1.

^b Traitement primaire : procédés physiques ou mécaniques comme la sédimentation et la filtration¹⁰.

L'élaboration de standards à suivre aide au développement de projets de réutilisation des eaux usées et à leur acceptation sociale¹. Comme la standardisation internationale discutée plus haut, une uniformisation des lignes directrices dans les pays méditerranéens pourrait contribuer à sécuriser les échanges économiques (produits agricoles) et touristiques (terrains de golf) dans la région³⁰. L'United Nations Environment Programme, en collaboration avec l'OMS, a publié en mai 2005 des lignes directrices pour la réutilisation des eaux usées municipales dans la région méditerranéenne. Ces recommandations abordent principalement les risques microbiologiques en lien avec les usages non potables. Cinq catégories d'usages ont été créées et des critères de qualité microbiologiques et physicochimiques ainsi que les traitements pouvant permettre de rejoindre ces critères sont détaillés. Les critères pour les nématodes et les coliformes fécaux ou les *E. coli* en lien avec l'usage qui nous intéresse sont résumés dans le tableau 8.

Tableau 8 Recommandations en rapport avec la qualité microbiologique de l'eau usée réutilisée dans la région méditerranéenne

Catégorie ^a	Usage ^b	Nématodes (nombre d'œufs/l moyenne arithmétique)	Coli fécaux ou <i>E. coli</i> (ufc/100 ml, moyenne géométrique)
I	Irrigation aires accès illimité (golf, parcs, terrains de sports)	≤ 0,1	≤ 200
III	Irrigation aires sans accès au public	≤ 1	≤ 10 ⁵
IV	Irrigation sous surface aires catégorie I	Aucune recommandation	Aucune recommandation

a La catégorie II n'est pas mentionnée puisqu'elle regroupe des usages qui ne sont pas abordés ici.

b Pour un même usage, les recommandations varient selon la méthode d'irrigation. Il s'agit d'un point de contrôle ou de minimisation des risques surajouté aux critères de qualité de l'effluent. C'est que l'irrigation sous la surface (catégories IV) est considérée moins à risque d'exposition que l'irrigation en jet (catégories I)^{5,9}.

Adapté du Mediterranean Action Plan, 2005²⁹.

Les recommandations microbiologiques présentées s'inspirent de celles formulées par Blumenthal *et al.*¹⁷ pour la mise à jour des recommandations de l'OMS en 2000, bien que d'autres données aient aussi été considérées²⁹. Des recommandations en rapport avec le monitoring des paramètres, la construction et l'opération des installations de traitement et l'utilisation des eaux usées traitées sont aussi formulées.

Aucune réglementation adressant spécifiquement la réutilisation des eaux usées n'existe pour le moment pour l'Union européenne. La seule référence à ce sujet retrouvée dans la législation est l'article 12 de l'*European wastewater directive* qui mentionne que « Les eaux usées traitées doivent être utilisées dans toutes les situations où cela est approprié »^{30,31}.

2.2.7 Canada

La Colombie-Britannique s'est dotée d'une réglementation concernant la réutilisation des eaux usées. La section 10 du *municipal sewage regulation* du Ministry of Environment, Lands and Parks de la Colombie-Britannique concerne en effet la réutilisation des eaux usées.

Cette réglementation statue sur les autorisations de réutilisation à obtenir et sur plusieurs normes d'opération et d'utilisation. Tous les usages sont regroupés en 2 catégories (accès public non restreint et accès public restreint) et on détaille le traitement, la qualité microbiologique (tableau 9) et physicochimique de l'effluent et les paramètres et fréquence de monitoring qui sont requis pour chacun des 2 niveaux possibles d'exposition du public. L'irrigation de toute surface gazonnée (parc, terrain de jeux, cimetière, golf, cours d'école, bordure d'autoroute) est un usage urbain à accès non restreint pour laquelle l'eau utilisée ne doit pas contenir plus de 2,2 coliformes fécaux/100 ml (moyenne). Aucun échantillon ne doit contenir plus de 14 coliformes fécaux/100 ml. Les terrains de golf, les cours d'école pendant la saison estivale et les portions retirées de parcs peuvent être classés dans la catégorie à accès restreint si l'eau est mise en réserve pour une durée minimale de 60 jours avant utilisation. Dans ces conditions, la moyenne tolérée est ≤ 200 coliformes fécaux/100 ml et aucun échantillon ne doit contenir plus de 800 coliformes fécaux/100 ml. Une caractérisation microbiologique plus complète est aussi demandée.

Tableau 9 Réglementation sur la qualité microbiologique des eaux usées traitées réutilisées en irrigation en Colombie-Britannique

Catégorie d'exposition	Usage	Qualité microbiologique de l'effluent-coliformes fécaux (ufc/100 ml)
Accès public non restreint	Usages urbains : parcs, terrains de jeux, cimetières, cours d'école, bordures d'autoroute, terrains de golf	moyenne $\leq 2,2$ maximum < 14
Accès public restreint	Parcs, terrains de golf, cours d'école (sous certaines conditions)	moyenne ≤ 200 maximum < 800

Tiré de la British Columbia Ministry of Environment, 2001³².

L'Alberta a adopté des lignes directrices spécifiques pour l'irrigation à l'aide d'eaux usées municipales. Cette technique est considérée comme une option pour disposer des eaux usées municipales et doit en priorité viser l'augmentation du rendement agricole tout en minimisant les risques environnementaux et à la santé³³. Une bonne partie des recommandations détaille donc les conditions de sol et d'eau à investiguer et à respecter pour assurer l'intégrité des cultures et de l'environnement. Pour ce qui est de la protection de la santé, des autorisations pour la construction et l'opération sont nécessaires et des normes de distribution sont suggérées. Un niveau de traitement et des standards de coliformes totaux et de coliformes fécaux ont été établis. Ces derniers ne visent pas l'utilisation agricole mais doivent être respectés pour l'irrigation de parcs et de terrains de golf (on ne discute pas de l'irrigation de d'autres surfaces gazonnées comme les cimetières, cours d'école, etc.). La moyenne géométrique mensuelle doit être $< 1\,000$ coliformes totaux/100 ml et 200 coliformes fécaux/100 ml.

Le recyclage des eaux usées se pratiquerait aussi au Manitoba, en Saskatchewan et en Ontario³. Le Canadian Council of Ministers of the Environment a tenu une session en 2002 sur la question de la qualité de l'eau réutilisée. Différents besoins à combler dans le futur, dont des lignes directrices fédérales et des standards de qualité provinciaux, ont alors été identifiés³.

Aussi, une session pour développer l'application de l'analyse de risque microbiologique pour l'évaluation de l'eau potable, des sources d'eau, des bioaérosols et des biosolides a été organisée par Santé Canada et l'Ontario Ministry of the Environment en janvier 2006³⁴. Santé Canada y a alors présenté un modèle stochastique d'analyse de risque que l'organisme se propose de raffiner et de réviser en collaboration avec les partenaires identifiés lors de cette séance ainsi que les décideurs et les distributeurs d'eau potable à travers le pays.

3 PORTRAIT QUÉBÉCOIS

La gestion des eaux usées traitées est assujettie à l'émission d'un certificat d'autorisation en vertu de l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement tandis que la construction et l'installation d'un système de traitement des eaux usées sont soumises à l'article 32 de la même loi. C'est donc dire qu'un projet de réutilisation des eaux usées traitées au Québec doit recevoir l'aval du MDDEP.

Deux demandes d'autorisation de réutilisation pour irriguer des terrains de golf ont d'ailleurs récemment fait l'objet de recommandations par ce ministère. Ces terrains sont situés à Saint-Mathieu-de-Beloeil en Montérégie et à Forestville sur la Côte Nord (MDDEP, communication personnelle). Le principal motif de ces requêtes est le manque d'eau pour irriguer de manière suffisante la grande surface gazonnée pendant les périodes d'été où la demande est plus importante mais la ressource plus rare. Le MDDEP a basé ses exigences d'autorisation sur les recommandations faites par l'Institut national de santé publique du Québec dans le document *Avis sur la réutilisation d'effluents de stations de traitement d'eaux usées domestiques pour l'irrigation de terrains de golf*. Il a en fait entériné la plupart des recommandations faites dans ce document. Il s'est aussi basé sur les distances minimales exigées entre les rejets et les sources d'eau potable dans les règlements Q-2, r.8-Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées et Q-3, r.1.3.-Règlement sur le captage des eaux souterraines.

Les autorisations d'utilisation des eaux usées pour ces terrains de golf dépendent de la conformité des demandeurs avec plusieurs directives (MDDEP, communication personnelle). Un ingénieur mandaté doit démontrer l'efficacité du système de traitement choisi à rencontrer ces critères de qualité (tableau 10).

Tableau 10 Critères de qualité de l'eau exigés par le MDDEP pour l'autorisation d'un projet de réutilisation des eaux usées traitées pour irrigation

Paramètre	Fréquence d'analyse	Valeur moyenne	Valeur maximale
Demande biochimique en oxygène	1/semaine de réutilisation	n.a.	15 mg/l
Matière en suspension	1/semaine de réutilisation	n.a.	30 mg/l
Turbidité	En continu	n.a.	5 UTN
<i>Escherichia coli</i>	1/jour réutilisation	20 cfu/100 ml ^a	200 cfu/100 ml ^b
Rayon de protection	n.a.	n.a.	100 m ^c

a Moyenne géométrique mensuelle après réactivation pour les installations en désinfection UV.

b Après réactivation pour les installations en désinfection UV.

c Avec brise vents.

Source : MDDEP, communication personnelle.

La valeur maximale de 200 *E. coli*/100 ml est basée sur les critères de qualité des eaux récréatives du Québec. Une caractérisation microbiologique plus complète de l'eau traitée et des aérosols doit être faite. Un système de surveillance de l'efficacité du traitement avec alarmes et installations de secours en cas de bris est requis. Un programme d'entretien du système doit être présenté. Des gicleurs sont utilisés pour arroser, mais ils doivent

fonctionner seulement en dehors des heures d'ouverture du terrain aux golfeurs et aux employés et ne doivent pas fonctionner en cas de forts vents ou de vents soufflant en direction des habitations. Des brises vents doivent être installés pour les endroits fréquentés. Les employés manipulant les installations doivent être formés adéquatement, avisés des risques, et de l'équipement de protection individuelle (vêtements, masques et gants) doit être mis à leur disposition. Les usagers du terrain doivent être avisés de l'utilisation d'eaux usées traitées pour irriguer et les installations et les endroits d'utilisation doivent être identifiés. Une zone tampon de 100 m pour les habitations et les distances requises dans les règlements Q-2, r.8 et Q-3, r.1.3 sont appliquées pour les sources d'eau potable.

Une autre demande provenant de la municipalité de St-Hyacinthe pour arroser des terrains municipaux avec les eaux usées municipales non traitées ($\sim > 35\,000$ coliformes fécaux/100 ml) ou les eaux de la rivière Yamaska ($\sim > 1\,000$ coliformes fécaux/100ml) a été adressée à la Direction régionale de la santé publique (DRSP) de la Montérégie. Les objectifs de la réutilisation étaient l'économie de l'eau traitée de qualité potable et l'utilisation d'une eau riche en nutriments pour l'irrigation. Il a été recommandé de ne pas aller de l'avant avec ce projet étant donné les risques à la santé de la population provenant de la réutilisation d'une eau avec une contamination fécale de cet ordre (DRSP Montérégie, communication personnelle).

La Direction des infrastructures du ministère des Affaires municipales ainsi que l'Union des municipalités du Québec ont été interrogées sur la possible existence de d'autres projets de réutilisation des eaux usées traitées à des fins d'irrigation dans les différentes municipalités du Québec. Aucune autre entreprise de ce genre n'a été identifiée. Les professionnels oeuvrant en santé et environnement dans les différentes DRSP de la province n'ont pas non plus rapporté d'autres projets similaires sur leur territoire.

4 ÉVALUATION DU RISQUE

Une des 3 approches à l'établissement de lignes directrices présentées plus haut utilise l'analyse de risque microbiologique. Le risque est la probabilité de survenue d'une perte, d'une blessure, d'une maladie³⁵. L'analyse de risque intègre l'évaluation, la gestion et la communication du risque. L'évaluation du risque est définie comme la caractérisation qualitative ou quantitative des effets néfastes potentiels associés à l'exposition des individus ou des populations à des agents microbiologiques, physiques ou chimiques. La gestion du risque est l'examen des différentes alternatives et le choix de l'action appropriée en tenant compte de l'évaluation du risque et des considérations économiques, sociales, politiques, légales et techniques. La communication du risque de manière interactive aux décideurs, aux gestionnaires et au public doit se faire de façon continue durant le processus¹⁹. La terminologie peut changer selon l'auteur consulté.

L'évaluation du risque est un outil, une source d'information sur le risque (à la santé ou autres)^{19,36} qui peut être utilisé pour établir des lignes directrices, comme par exemple pour la réutilisation des eaux usées. Ainsi, elle peut constituer un outil pour aider à gérer le risque relié à une telle pratique. Tel que mentionné plus haut, l'approche de l'évaluation du risque est préventive et particulièrement utile lorsque le risque acceptable se situe sous le niveau habituellement détecté par les études épidémiologiques, à moins d'utiliser de très grands échantillons¹⁷. Le niveau de risque décelé par l'évaluation quantitative du risque pourrait être environ au moins 2 fois moindre que celui mis en évidence par les études épidémiologiques²². Un cadre conceptuel d'évaluation quantitative du risque microbiologique a été dérivé de ce qui a été développé par le National Research Council (1983) pour l'évaluation quantitative du risque associé à l'exposition aux produits chimiques^{19,21}. Ce cadre comprend 4 étapes :

- Identification du danger : micro-organismes pathogènes d'intérêt et leurs effets;
- Évaluation de l'exposition : sources et concentration (effet du traitement, transport, survie, croissance), voies, fréquence et durée de l'exposition, nature et taille de la population exposée;
- Évaluation de la relation dose-réponse : caractérisation de la relation entre les doses administrées et l'incidence des effets (infection/maladie) à la santé;
- Caractérisation du risque : intégration de l'information sur l'exposition et la relation dose-réponse pour estimer l'ampleur du problème et évaluer la variabilité et l'incertitude reliées à cette estimation^{19,35,36}. La perception du risque par la population touchée peut également être considérée à cette étape.

Il faut cependant porter attention au fait que les agents microbiologiques diffèrent des agents chimiques en plusieurs points :

- Les micro-organismes pathogènes peuvent se reproduire et s'inactiver dans une source ou un échantillon.
- Les micro-organismes pathogènes ont une distribution hétérogène dans l'eau.

- Il peut y avoir transmission de personne à personne (transmission secondaire) à partir d'un cas symptomatique ou non dont la source d'infection était les eaux usées. Ce mode de transmission est particulièrement important pour les virus¹⁹.
- Il y a variabilité dans la virulence des souches d'un micro-organisme pathogène et dans la susceptibilité des hôtes (selon l'état de santé et l'immunité)^{21,35}.

4.1 IDENTIFICATION DU DANGER

La première étape d'une analyse de risque microbiologique est l'identification des micro-organismes pathogènes pouvant représenter un risque à la santé humaine lors de l'exposition qui nous intéresse. Plusieurs micro-organismes pathogènes sont présents dans les eaux usées. Les plus significatifs (incidence de la maladie causée, DALY) pour la population étudiée ou des représentants de ceux-ci (micro-organismes pathogènes de référence, à ne pas confondre avec les indicateurs utilisés dans le monitoring) doivent être sélectionnés pour faire l'évaluation de risque²¹. La limite principale de l'utilisation de pathogènes de référence réside dans le fait que tous les micro-organismes pathogènes d'un groupe n'ont pas les mêmes caractéristiques²¹. Les facteurs suivants doivent donc être pris en considération dans le choix de micro-organismes pathogènes de référence :

- L'incidence, la distribution et la sévérité des maladies causées dans la population exposée.
- La concentration dans les eaux usées et le potentiel infectieux des micro-organismes pathogènes.
- La résistance dans l'environnement et aux traitements des micro-organismes pathogènes²¹.

Les micro-organismes pathogènes de référence choisis doivent avoir une combinaison de ces dernières caractéristiques qui en font un danger à la santé équivalent ou même plus important que les autres micro-organismes pathogènes de leur groupe⁹. L'Organisation mondiale de la Santé a consigné de l'information pertinente à ce sujet dans ses *Guidelines for drinking-water quality* (tableau 11).

Il s'agit d'information destinée à l'établissement de lignes directrices pour l'eau de consommation mais qui traite de façon générale des micro-organismes pathogènes présents dans l'eau. Un résumé des micro-organismes pathogènes de référence souvent utilisés jusqu'à maintenant dans l'évaluation du risque est présenté au tableau 12.

On remarque que les micro-organismes pathogènes de référence privilégiés (tableau 12) représentent assez bien leur groupe en regard des caractéristiques importantes présentées au tableau précédent (tableau 11). Afin de faire un choix, les caractéristiques de ces micro-organismes pathogènes de référence candidats ont été examinées de plus près.

Tableau 11 Micro-organismes pathogènes présents dans l'eau et importance dans l'approvisionnement en eau

Pathogen	Health significance	Persistence in water supplies ^a	Resistance to chlorine ^b	Relative infectivity ^c	Important animal source
Bacteria					
<i>Burkholderia pseudomallei</i>	Low	May multiply	Low	Low	No
<i>Campylobacter jejuni</i> , <i>C. coli</i>	High	Moderate	Low	Moderate	Yes
<i>Escherichia coli</i> – Pathogenic ^d	High	Moderate	Low	Low	Yes
<i>E. coli</i> – Enterohaemorrhagic	High	Moderate	Low	High	Yes
<i>Legionella</i> spp.	High	Multiply	Low	Moderate	No
Non-tuberculous mycobacteria	Low	Multiply	High	Low	No
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ^e	Moderate	May multiply	Moderate	Low	No
<i>Salmonella typhi</i>	High	Moderate	Low	Low	No
Other salmonellae	High	May multiply	Low	Low	Yes
<i>Shigella</i> spp.	High	Short	Low	Moderate	No
<i>Vibrio cholerae</i>	High	Short	Low	Low	No
<i>Yersinia enterocolitica</i>	High	Long	Low	Low	Yes
Viruses					
Adenoviruses	High	Long	Moderate	High	No
Enteroviruses	High	Long	Moderate	High	No
Hepatitis A virus	High	Long	Moderate	High	No
Hepatitis E virus	High	Long	Moderate	High	Potentially
Noroviruses and sapoviruses	High	Long	Moderate	High	Potentially
Rotaviruses	High	Long	Moderate	High	No
Protozoa					
<i>Acanthamoeba</i> spp.	High	Long	High	High	No
<i>Cryptosporidium parvum</i>	High	Long	High	High	Yes
<i>Cyclospora cayentanensis</i>	High	Long	High	High	No
<i>Entamoeba histolytica</i>	High	Moderate	High	High	No
<i>Giardia intestinalis</i>	High	Moderate	High	High	Yes
<i>Naegleria fowleri</i>	High	May multiply ^f	High	High	No
<i>Toxoplasma gondii</i>	High	Long	High	High	Yes
Helminths					
<i>Dracunculus medinensis</i>	High	Moderate	Moderate	High	No
<i>Schistosoma</i> spp.	High	Short	Moderate	High	Yes

Note: Waterborne transmission of the pathogens listed has been confirmed by epidemiological studies and case histories. Part of the demonstration of pathogenicity involves reproducing the disease in suitable hosts. Experimental studies in which volunteers are exposed to known numbers of pathogens provide relative information. As most studies are done with healthy adult volunteers, such data are applicable to only a part of the exposed population, and extrapolation to more sensitive groups is an issue that remains to be studied in more detail.

^a Detection period for infective stage in water at 20°C: short, up to 1 week; moderate, 1 week to 1 month; long, over 1 month.

^b When the infective stage is freely suspended in water treated at conventional doses and contact times. Resistance moderate, agent may not be completely destroyed.

^c From experiments with human volunteers or from epidemiological evidence.

^d Includes enteropathogenic, enterotoxigenic and enteroinvasive.

^e Main route of infection is by skin contact, but can infect immunosuppressed or cancer patients orally.

^f In warm water.

Tiré de WHO, 2006³⁶.

Tableau 12 Exemples de micro-organismes pathogènes de référence retrouvés dans les excréta et leurs caractéristiques

Hazard group	Example Reference Pathogens	Characteristics of reference pathogens	Environmental stage, size (µm) and shape for group
Viruses	rotavirus	Highly infectious, not as persistent as HAV, Norwalk-like viruses and some other enteric viruses	Virion (0.02-0.08) generally spherical, protein coat protecting nucleic acid (DNA or RNA)
Bacteria	<i>Salmonella</i> sp. or <i>E. coli</i>	Always present in sewage, readily inactivated by disinfection	cell or dormant cell (0.1-2) cocci-rod
Parasitic protozoa	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Not as prevalent as <i>Giardia</i> , but highly persistent and halide resistant.	Cyst or oocyst (4-40) oval-spherical
Helminths	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Most persistent in soil/faeces, embryo must develop prior to human exposure	Ova (egg, 30-80) variable

Tiré de Patterson et Ashbolt, 2003²¹.

Les rotavirus sont la cause la plus importante de gastroentérite chez les enfants de moins de 2 ans^{10,18}. Le mode préférentiel de transmission n'est cependant pas la nourriture ou l'eau mais plutôt le contact direct¹¹, mais quelques épidémies reliées aux eaux usées sont rapportées¹⁰. Les calicivirus (notamment les virus de type Norwalk) sont reconnus comme les principaux agents des gastroentérites épidémiques survenant dans les collectivités¹¹. Ils sont fréquemment rapportés pour les gastroentérites transmises par l'eau. Le virus de Norwalk est celui qui est le plus souvent associé aux épidémies de gastroentérites causées par l'eau et la nourriture aux États-Unis¹⁹. Ce virus serait responsable d'environ la moitié des épidémies de gastroentérites aux États-Unis^{10,19}. Les adénovirus et celui de l'hépatite A sont les plus susceptibles de survivre aux traitements¹¹. Les adénovirus sont les deuxièmes micro-organismes pathogènes en importance pour les gastroentérites de l'enfance après les rotavirus¹⁹.

Les salmonelles constituent l'un des genres bactériens les plus répandus et préoccupants au regard de la santé publique¹¹. Il s'agit de la bactérie pathogène présente en plus grande quantité dans les eaux usées¹⁰. C'est la deuxième cause la plus souvent diagnostiquée pour les cas de gastroentérites aux États-Unis¹⁹. Le mode de transmission le plus important est la nourriture (90 % des cas) mais des épidémies reliées à l'eau ont été documentées¹⁹. *Shigella* a une dose infectante relativement faible (10 à 10² organismes)¹⁰ et cause des affections plus sévères que *Salmonella* ou *Campylobacter*¹⁹. Cependant, la majorité des infections sont transmises de personne à personne et 99 % des cas sont retrouvés dans les pays en voie de développement¹⁰. *E. coli* O157:H7 a une dose infectante faible et peut causer des effets sévères¹⁰. La nourriture serait la première source d'infection¹⁰, mais il a été détecté dans l'eau et des épidémies reliées aux eaux récréatives¹⁹ et à l'eau potable³⁷ sont documentées. *Campylobacter* a une dose infectante faible (≈ 500) et est maintenant la cause identifiée la plus fréquente de diarrhée aux États-Unis^{10,19}. Il peut causer des effets sévères, est transmis

entre autres par l'eau et a été détecté dans les eaux usées^{10,19}. *Escherichia coli* O157:H7 et *Campylobacter* se classent respectivement au 4^e et 5^e rang en terme de nombre de cas de maladies infectieuses causées lors d'épidémies reliées à l'approvisionnement en eau rapportés aux États-Unis, entre 1989 et 1994. En tête de liste on retrouve les étiologies indéterminées suivies de *Cryptosporidium* et de *Giardia*¹⁹.

Cryptosporidium parvum a causé de nombreuses épidémies d'origine hydrique depuis le début des années 1980 dans les pays industrialisés¹¹. Il est maintenant reconnu comme un parasite important en Amérique du Nord¹¹, l'infection pouvant être sévère chez les personnes immunosupprimées^{19,10}. Sa dose infectante est très faible et les oocystes présentent une résistance exceptionnelle au chlore¹¹ et aux conditions environnementales¹⁰. Certains considèrent qu'il s'agit du plus intéressant micro-organisme pathogène de référence disponible pour les parasites, bien que son identification et la détermination de la viabilité des oocystes posent problème¹⁴. La giardiase (causée par *Giardia lamblia*) est actuellement la parasitose humaine la plus souvent diagnostiquée en Amérique du Nord¹¹. Dans une étude conduite dans des stations d'épuration du Québec, le nombre de kystes/l de *Giardia lamblia* retrouvés dans les eaux d'égouts variait entre 10³ à 10⁴ et n'était jamais nul²⁰. Son mode de transmission usuel est de personne à personne ou par la nourriture mais il est l'un des agents étiologiques les plus importants dans les épidémies de maladies reliées à l'eau^{10,19}.

Finalement, les caractéristiques des helminthes ne seront pas développées ici puisque les infections qu'ils causent ne sont pas endémiques au Québec¹¹.

Une évaluation du risque associé à la réutilisation des eaux usées est présentée dans la dernière version des lignes directrices nationales australiennes publiées pour consultation en octobre 2005. Les rotavirus ont été choisis comme pathogène de référence pour les virus à cause de la prévalence de l'infection, de la possibilité d'effets sévères et de la disponibilité d'un modèle dose-réponse⁹. On mentionne qu'ils ont un haut pouvoir infectieux⁹. Il est indiqué que les adénovirus auraient aussi été de bons candidats. *Campylobacter* a été sélectionné parmi les pathogènes bactériens car il est de loin la cause première des gastroentérites bactériennes en Australie⁹. *Salmonella*, *E. coli* O157:H7 et *Shigella* ont aussi été considérés. Pour les protozoaires, *Cryptosporidium parvum* est un bon choix puisqu'il a un assez grand pouvoir infectieux, est résistant à la chloration et est l'un des micro-organismes pathogènes transmis par l'eau des plus importants dans les pays industrialisés⁹. *Giardia lamblia* est présent en quantité plus importante mais est plus facilement éliminé par les traitements et est plus sensible à la désinfection que *Cryptosporidium*⁹. *Cryptosporidium parvum* a donc été choisi. Aucun micro-organisme pathogène n'a été retenu pour représenter les helminthes puisque ces infections ne sont pas endémiques en Australie⁹. Il est indiqué qu'au besoin, le micro-organisme pathogène de référence pour les protozoaires peut être utilisé pour les helminthes. Plusieurs des caractéristiques énoncées rejoignent celles énumérées dans le tableau 12.

Le modèle stochastique d'analyse quantitative du risque microbiologique développé par Santé Canada dans le domaine de l'eau potable, le *drinking water risk assessment model*,

utilise 4 micro-organismes pathogènes index : rotavirus, *E. coli* O157:H7, *Cryptosporidium parvum* et *Giardia lamblia*³⁴.

Un portrait de l'incidence des maladies entériques d'origine hydrique au Québec peut être dressé à l'aide des données du fichier des maladies à déclaration obligatoires (MADO). Bien que ces données présentent des limites importantes (sous-déclaration, biais de détection), elles sont les meilleures disponibles actuellement au Québec pour suivre l'évolution des maladies transmissibles³⁸. Les maladies entériques d'origine alimentaire et hydrique regroupent 5 877 cas, soit 22,3 % de toutes les MADO déclarées en 2002. La cause de maladie entérique la plus fréquemment déclarée au Québec en 2002 a été *Campylobacter*, suivie de *Salmonella*, *Giardia* et de *E. Coli* O157:H7 (figure 4)³⁸.

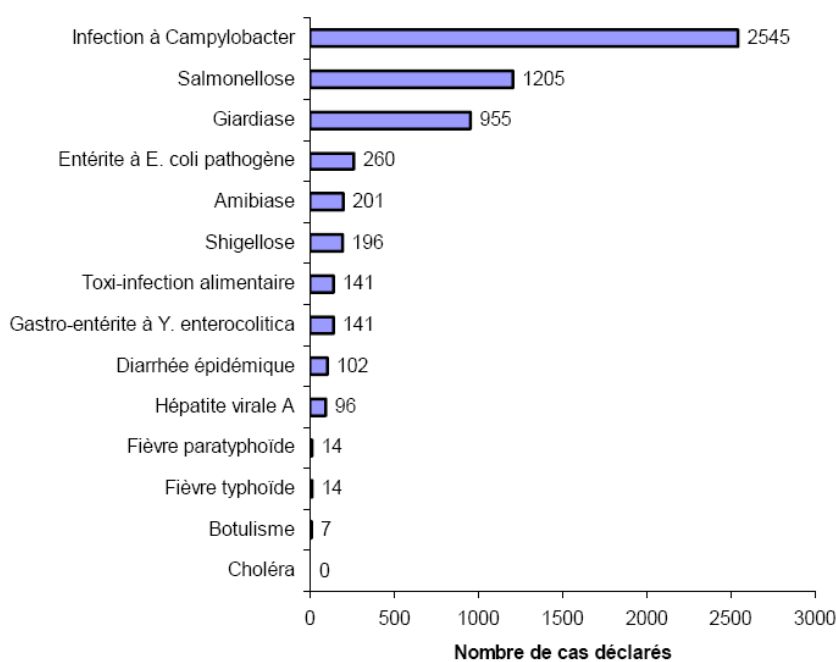


Figure 4 Nombre de cas déclarés selon la maladie pour les maladies entériques, Québec, 2002

Tiré du MSSS, 2005³⁸.

Les principaux effets des micro-organismes pathogènes abordés sont consignés au tableau 1 présenté plus haut (section 1). À cause des caractéristiques des micro-organismes pathogènes et de l'occurrence des infections qu'ils causent ainsi que pour des raisons de disponibilité des données, les micro-organismes pathogènes suivants seront utilisés dans l'évaluation du risque :

- Rotavirus pour représenter le groupe des virus puisqu'ils sont la cause la plus importante de gastroentérites chez les enfants de moins de 2 ans^{10,18}.
- *Campylobacter* comme référence pour les bactéries étant donné qu'il est l'agent étiologique de maladies entériques le plus fréquemment déclaré au Québec³⁸ et dans d'autres pays industrialisés^{9,10,19}.

- *Cryptosporidium parvum* pour les protozoaires car il est résistant à divers traitements et conditions environnementales et est une cause importante de maladies entériques reliées à l'eau dans les pays développés^{11,19}. On ne le retrouve pas à la figure 4 puisqu'il est inclus dans les MADDO du Québec seulement depuis 2003.
- Aucun micro-organisme pathogène de référence pour les helminthes puisqu'ils ne sont pas endémiques au Québec¹¹.

Cependant, il faut retenir que ces choix se basent sur les données disponibles, qui peuvent présenter certaines faiblesses :

- L'incidence basée sur les cas déclarés est sous estimée^{19,39}.
- Les micro-organismes pathogènes présents dans les eaux usées causent plusieurs pathologies différentes et les gastroentérites ne sont pas seulement de nature infectieuse³⁹.
- Les micro-organismes pathogènes et les cas reliés à l'eau potable ou récréative ne s'appliquent pas nécessairement aux eaux usées.

4.2 ÉVALUATION DE L'EXPOSITION

Dans le but de caractériser le risque relié à l'exposition aux micro-organismes pathogènes identifiés plus haut, une évaluation de l'exposition doit être faite. Cette évaluation doit prendre en considération les concentrations et distributions des micro-organismes pathogènes dans les sources, les modifications de ces concentrations suite au traitement, au transport, à l'inactivation et à la recroissance, la voie d'exposition, le volume, la fréquence et la durée de l'exposition ainsi que la taille et la nature de la population exposée.

Pour le cas qui nous intéresse, c'est-à-dire la réutilisation des eaux usées municipales pour l'irrigation de surfaces gazonnées, la source d'exposition considérée est l'eau usée. Les concentrations des eaux usées retrouvées dans la littérature pour les 3 micro-organismes pathogènes de référence choisis ainsi que pour un indicateur fréquemment retrouvé dans les lignes directrices sont présentées au tableau 13.

Tableau 13 Concentration des micro-organismes pathogènes de référence et d'un indicateur bactérien dans les eaux usées non traitées

Agent microbien	Concentration dans les eaux usées (n ^{bre} /l)
Rotavirus ou virus entériques	10 ² -10 ⁵ , 1-10 ² (données québécoises et canadiennes)
<i>Campylobacter</i> ou <i>Salmonella</i>	10 ³ -10 ⁴
<i>Cryptosporidium parvum</i>	10 ³ -10 ⁴
Coliformes fécaux	10 ⁶ -10 ⁸ , 10 ⁷ (données québécoises)

n^{bre}/l = nombre/litre.

Données tirées des références 2, 8, 9, 12, 20 et 21.

Les concentrations en gras dans le tableau seront utilisées pour l'analyse de risque, soit parce qu'elles correspondent aux données canadiennes ou québécoises ou parce qu'elles

sont de l'ordre de grandeur le plus fréquemment rencontré dans la littérature des pays industrialisés.

Les eaux usées réutilisées en Amérique du Nord sont traitées. C'est pourquoi il importe de considérer l'effet des différents traitements susceptibles d'être utilisés sur la charge microbienne des eaux usées :

- traitement primaire + traitement biologique (**traitement secondaire sans désinfection**);
- sédimentation primaire + traitement biologique + désinfection (**traitement secondaire + désinfection**);
- sédimentation primaire + traitement biologique + désinfection + coagulation + filtration + désinfection (**traitement tertiaire**)⁸⁻⁹.

Tableau 14 Effet du traitement des eaux usées sur la concentration des micro-organismes pathogènes de référence et d'un pathogène indicateur

Agent microbien	Concentration dans les eaux usées (n ^{bre} /l)	Traitement appliqué	Log d'enlèvement ^a	Concentration dans les eaux usées traitées (n ^{bre} /l) (calculée)
Rotavirus	10 ²	Secondaire	0-2	1-10 ²
	10 ²	Secondaire + désinfection	1 à 3	10 ⁻¹ -10
	10 ²	Tertiaire	6	10 ⁻⁴
Campylobacter	10 ⁴	Secondaire	1-3	10-10 ³
	10 ⁴	Secondaire + désinfection	> 6	< 10 ⁻²
	10 ⁴	Tertiaire	> 6	< 10 ⁻²
<i>Cryptosporidium parvum</i>	10 ³	Secondaire	0,5-1	10 ² -10 ^{2,5}
	10 ³	Secondaire + désinfection	0,5-1	10 ² -10 ^{2,5}
	10 ³	Tertiaire	4-5	10 ⁻² -10 ⁻¹
Coliformes fécaux	10 ⁷	Secondaire	1-3	10 ⁴ -10 ⁶
	10 ⁷	Secondaire + désinfection	> 6	< 10
	10 ⁷	Tertiaire	> 6	< 10

a Tiré des recommandations australiennes.

Tableau tiré des références 2, 8, 9, 12 et 20.

Les données en caractères gras sont celles qui seront utilisées pour l'évaluation du risque de manière à être conservateurs par rapport à l'efficacité du traitement. Ces données sur l'efficacité du traitement sont celles pouvant être obtenues avec des technologies et installations bien maîtrisées et opérées. Advenant le cas où ces conditions ne sont pas remplies, l'efficacité peut être moindre. Ces circonstances ne sont pas considérées ici bien qu'il ait été montré qu'elles existent au Québec²⁰. Cependant, à titre indicatif, pour les catégories pour lesquelles nous disposons de données québécoises mesurées (concentration des eaux usées en virus entériques et coliformes fécaux suite à un traitement secondaire)²⁰, les données théoriques calculées présentées en gras au tableau 14

permettent un estimé conservateur. Nous avons aussi pris pour acquis que l'efficacité du traitement était la même pour les bactéries indicatrices et pour les bactéries pathogènes.

L'évaluation du risque sera faite pour la population exposée seulement et non pour la population générale qui n'utilise pas ou n'habite pas à proximité des terrains irrigués, pour laquelle de toute façon le risque est nul. La source considérée étant l'eau, les voies d'absorption sont multiples : ingestion, inhalation d'aérosols et contact cutané. Ces aérosols peuvent théoriquement se déposer sur d'autres surfaces comme le sol et la nourriture qui deviennent alors des sources. En excluant l'exposition au travail, l'ingestion d'eau est la seule voie considérée dans plusieurs études sur la réutilisation des eaux usées²¹. Elle est considérée comme la plus significative (en terme de volume et de fréquence) par certains auteurs⁹ et est celle qui sera évaluée ici. Il importe cependant de mentionner qu'il n'y a pas de consensus dans la littérature sur l'importance de l'inhalation d'aérosols et des infections respiratoires qui peuvent en résulter¹⁹. L'irrigation en jet produit des aérosols¹⁹. L'US EPA mentionne que les études démontrent que le risque à la santé associé aux aérosols générés par l'irrigation en jet avec des eaux usées est faible et que les distances à respecter incluses dans les lignes directrices sont plutôt subjectives². Ces études portaient sur de l'eau désinfectée⁷. Aucun cas de maladie reliée à cette pratique n'aurait été documenté aux États-Unis⁷. Cependant, certains micro-organismes pathogènes respiratoires ont une dose infectante plus faible que des micro-organismes pathogènes transmis par la voie gastro-intestinale. De plus, les aérosols peuvent voyager sur de grandes distances (plusieurs centaines de mètres) sous des conditions particulières⁷. En effet, plusieurs rapports ont estimé que les coliformes pouvaient être transportés sur 400 à 650 m sous un vent d'une vitesse moyenne et une étude mentionne que de 5 à 30 km pourraient être nécessaires avant que la concentration bactérienne d'un nuage aérosol soit réduite au niveau de base⁴⁰. Une étude conclue qu'une désinfection au chlore réussie est plus pratique et économique qu'une zone tampon, dont la distance de 100 m ne peut assurer qu'une réduction très limitée de la concentration en micro-organismes⁴⁰. Dans un autre ordre d'idées et dans le but de simplifier, l'inactivation ou la recroissance des micro-organismes pathogènes dans l'environnement ainsi que le transport, vers d'autres sources d'eau par exemple, ne seront pas abordés ici.

Le volume et la fréquence du type d'exposition choisi (eau usée traitée par ingestion) ont été fixés en respectant ce qui a été utilisé dans les études antérieures ayant procédé au même genre d'exercice et aussi par jugement. Un volume de 1 ml ingéré 50 fois/personne/année et 2 fois par semaine soit 104 fois/personne/année a été proposé pour l'irrigation municipale⁹ et l'irrigation de terrains de golf¹⁴ respectivement. Un volume moindre de 0,1 ml mais ingéré 104 fois/personne/année est aussi proposé dans les mêmes lignes directrices pour les mêmes usages⁹. L'US EPA propose dans ses lignes directrices un volume de 1 ml ingéré 365 fois/personne/année pour l'irrigation résidentielle et suggère un ajustement non précisé pour d'autres usages comme l'irrigation municipale. Nous utiliserons un volume de 1 ml ingéré 104 fois/personne/année. Le risque sera évalué pour une période d'une année.

Tableau 15 Paramètres utilisés dans l'évaluation du risque de réutilisation des eaux usées à des fins d'irrigation municipale

Volume de l'exposition par ingestion (ml)	1
Fréquence d'exposition (fréquence/personne/année)	104
Durée de l'exposition (année)	Calculée pour une année

4.3 ÉVALUATION DE LA RELATION DOSE-RÉPONSE

Des relations dose-réponse sont disponibles pour quelques micro-organismes pathogènes mais ces données ont plusieurs limites (détaillées plus haut, section 2.1), découlant en partie du fait qu'une relation dose-réponse représente seulement quelques-unes des multiples combinaisons hôte-souche pathogène possibles. Néanmoins, elles sont utilisées en analyse quantitative de risque microbiologique pour faire le lien entre l'exposition et la probabilité d'infection/maladie. Le tableau suivant présente celles retenues pour les micro-organismes pathogènes d'intérêt dans cette évaluation.

Tableau 16 Relations dose-réponse pour les micro-organismes pathogènes de référence

Pathogène de référence	Distribution	Modèle et paramètres	Probabilité d'infection par organisme
Rotavirus	Beta-Poisson	$P = 1 - (1 + d/5,6[2^{1/0,27} - 1])^{-0,27}$	$2,663 \times 10^{-1}$
<i>Campylobacter</i>	Beta-Poisson	$P = 1 - (1 + d/896[2^{1/0,145} - 1])^{-0,145}$	$1,78 \times 10^{-2}$
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Exponentiel	$P = 1 - \exp(-0,059d)$	$5,729 \times 10^{-2}$

P = probabilité d'infection.

d = dose (nombre d'organismes).

Tiré de NRMMC et EPHC, 2005⁹.

4.4 CARACTÉRISATION DU RISQUE

Il s'agit maintenant de combiner l'information rassemblée sur l'exposition et la relation dose-réponse pour estimer le risque microbiologique relié à la pratique évaluée. On peut ensuite comparer ce risque calculé avec un niveau de risque que l'on considère acceptable ou tolérable, habituellement fixé à l'avance. On peut ensuite juger si cette pratique dans la version proposée est acceptable du point de vue des risques à la santé ou si des mesures supplémentaires de minimisation du risque doivent être appliquées, dans l'éventualité où l'on désire toujours mettre le projet de l'avant.

Étant donné qu'une infection peut être asymptomatique^{14,19} et qu'à ce moment l'impact sur la mortalité ou la morbidité (effet) est probablement nul ou du moins difficile à identifier et donc à quantifier, il est pertinent de tenir compte de la proportion de gens asymptomatiques dans l'évaluation des risques. Ainsi, la probabilité d'infection lors d'un événement d'exposition sera multipliée par un ratio infection/maladie établi pour chaque pathogène de manière à obtenir une probabilité de maladie⁹. Nous nous intéresserons donc seulement aux effets que sont l'infection symptomatique ou le décès.

Dans la population exposée, tous les individus sont considérés susceptibles aux infections à *Campylobacter* et *Cryptosporidium* mais la fraction susceptible à l'infection par un rotavirus correspond seulement à la population âgée en bas de 5 ans^{9,11}, soit 4,9 % de la population du Québec en 2005⁴¹. Nous incorporerons ces données dans notre analyse.

Le risque acceptable a été fixé à 10^{-6} DALY/personne/année (voir section 2.2.5). Il s'agit de la valeur qui a été utilisée par l'OMS pour établir ses lignes directrices sur l'eau potable et ses nouvelles lignes directrices sur la réutilisation des eaux usées et par les instances gouvernementales australiennes pour leurs lignes directrices sur la réutilisation des eaux usées. Ce niveau correspond environ à un excès de risque de cancer à vie de 10^{-5} ou à un risque annuel de 1/1 000 d'être infecté par un micro-organisme pathogène causant des symptômes entériques peu mortels²⁵. Le fardeau de la maladie (DALY) occasionné par les micro-organismes pathogènes choisis a été calculé pour toutes les sources d'eau (pas uniquement les eaux usées) et il s'agit de données provenant des Pays-Bas⁴². Toutes ces données ont été combinées dans une analyse présentée au tableau 17.

Tableau 17 Risque pour 3 micro-organismes pathogènes de référence lors d'irrigation urbaine avec des eaux usées traitées selon 3 niveaux différents

	Traitement	Rotavirus	<i>Campylobacter</i>	<i>Crypto. parvum</i>
Concentration eaux traitées (n^{bre}/l) ^a	Secondaire	10^2	10^3	$10^{2,5}$
	Secondaire + désinfection	10	10^{-2}	$10^{2,5}$
	Tertiaire	10^{-4}	10^{-2}	10^{-1}
Volume par évènement (l)		0,001	0,001	0,001
Dose par évènement (nombre d'organismes)	Secondaire	0,1	1	$3,162 \times 10^{-1}$
	Secondaire + désinfection	0,01	1×10^{-5}	$3,162 \times 10^{-1}$
	Tertiaire	1×10^{-7}	1×10^{-5}	1×10^{-4}
Probabilité d'infection par organisme ^b		$2,663 \times 10^{-1}$	$1,78 \times 10^{-2}$	$5,729 \times 10^{-2}$
Probabilité d'infection par évènement	Secondaire	$2,662 \times 10^{-2}$	$1,78 \times 10^{-2}$	$1,812 \times 10^{-2}$
	Secondaire + désinfection	$2,662 \times 10^{-3}$	$1,78 \times 10^{-7}$	$1,812 \times 10^{-2}$
	Tertiaire	$2,662 \times 10^{-8}$	$1,78 \times 10^{-7}$	$5,729 \times 10^{-6}$
Ratio maladie/infection ^b		0,88	0,3	0,7
Probabilité de maladie par évènement	Secondaire	$2,343 \times 10^{-2}$	$5,34 \times 10^{-3}$	$1,268 \times 10^{-2}$
	Secondaire + désinfection	$2,343 \times 10^{-3}$	$5,34 \times 10^{-8}$	$1,268 \times 10^{-2}$
	Tertiaire	$2,343 \times 10^{-8}$	$5,34 \times 10^{-8}$	$4,010 \times 10^{-6}$
Probabilité maladie par année (X 104)	Secondaire	2,437	$5,553 \times 10^{-1}$	1,319
	Secondaire + désinfection	$2,437 \times 10^{-1}$	$5,553 \times 10^{-6}$	1,319
	Tertiaire	$2,437 \times 10^{-6}$	$5,553 \times 10^{-6}$	$4,171 \times 10^{-4}$
Fardeau de la maladie (DALY par cas) ^c		$1,4 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$1,47 \times 10^{-3}$
Fraction susceptible (%) ^d		4,9	100	100
Fardeau de la maladie par année (DALY/personne/année)	Secondaire	$1,672 \times 10^{-3}$ ou $\sim 2 \times 10^{-3}$	$2,555 \times 10^{-3}$ ou $\sim 3 \times 10^{-3}$	$1,939 \times 10^{-3}$ ou $\sim 2 \times 10^{-3}$
	Secondaire + désinfection	$1,672 \times 10^{-4}$ ou $\sim 2 \times 10^{-4}$	$2,555 \times 10^{-8}$ ou $\sim 3 \times 10^{-8}$	$1,939 \times 10^{-3}$ ou $\sim 2 \times 10^{-3}$
	Tertiaire	$1,672 \times 10^{-9}$ ou $\sim 2 \times 10^{-9}$	$2,555 \times 10^{-8}$ ou $\sim 3 \times 10^{-8}$	$6,131 \times 10^{-7}$ ou $\sim 2 \times 10^{-7}$

a Voir tableau 14 b Référence 9 c Référence 42 d Références 9 et 41

Les valeurs en gras correspondent à un risque acceptable tel que défini plus haut dans la présente section. Un traitement secondaire avec une désinfection, tel que proposé par l'US EPA pour certains usages et qui peut permettre d'atteindre la limite des bactéries coliformes fécales exigée dans leurs lignes directrices pour les usages qui nous intéressent (0 coliformes fécaux/100 ml), serait efficace pour réduire le risque des agents bactériens sous la barre du risque acceptable (10^{-6} DALY/personne/année). Cependant, ce traitement n'est pas aussi efficace pour la réduction des risques posés par les virus et les protozoaires, qui restent au-dessus de ce qui est considéré ici comme acceptable

(10^{-6} DALY/personne/année). C'est donc dire que les normes de l'US EPA pour la concentration des effluents en bactéries indicatrices pourraient être rencontrées alors que le risque à la santé engendré par les virus et les protozoaires demeure substantiel. Ce phénomène a d'ailleurs été décrit par plusieurs auteurs^{2,9,10,20,21}. Le traitement tertiaire considéré ici est le seul qui assure une protection adéquate pour les 3 groupes de micro-organismes pathogènes.

En appliquant la même réflexion avec les mêmes données mais à partir du risque que l'on considère comme acceptable (10^{-6} DALY) (cheminement inverse), on peut calculer plus précisément l'efficacité du traitement nécessaire (log d'enlèvement) pour la qualité d'eau usée et l'utilisation considérées ici. Pour les pathogènes viraux (rotavirus), il faut 3,22 log d'enlèvement pour que l'utilisation devienne sécuritaire. Pour les pathogènes bactériens, il faut 4,41 log d'enlèvement et pour les parasites, il faut pouvoir enlever 3,79 log. Une approximation sécuritaire serait une efficacité de traitement nécessaire de 4, 5 et 4 log respectivement pour les virus, les bactéries et les parasites. Tout autre traitement que ceux proposés qui rencontre ces exigences pourrait être appliqué (tableau 18).

À partir de ces valeurs, on peut aussi calculer la concentration en micro-organismes pathogènes (et pour rendre ces données opérationnalisables, pour un indicateur-coliformes fécaux) des eaux usées traitées qui correspond à cette efficacité de traitement nécessaire calculée (4 log pour les virus, 5 log pour les bactéries et 4 log pour les parasites) pour une eau brute de la qualité rencontrée ici, et donc au risque acceptable (10^{-6} DALY). Une concentration des eaux usées traitées en coliformes fécaux $< 10^2/l$ (5 log d'enlèvement sur $10^7/l$) permettrait de garder le risque relié aux pathogènes bactériens sous la barre du 10^{-6} DALY voulu. Avec la même efficacité de traitement pour les pathogènes bactériens, la concentration en *Campylobacter* serait $< 10^{-1}/l$ (5 log d'enlèvement sur $10^4/l$). Des concentrations des eaux usées traitées en rotavirus $< 10^{-2}/l$ (4 log d'enlèvement sur $10^2/l$) et en *Cryptosporidium parvum* $< 10^{-1}/l$ (4 log d'enlèvement sur 10^3) seraient sécuritaires (tableau 18).

Lorsque calculée selon la qualité d'eau brute considérée ici, la qualité de l'effluent requise (10^2 coliformes fécaux/l, tableau 18 colonne 4) pour que le risque soit $< 10^{-6}$ DALY est moindre que celle exigée par l'US EPA (0 coliforme fécal/l) et correspond à celle demandée dans les lignes directrices australiennes (section 2.2.5).

Tableau 18 Calculs de l'efficacité de traitement et de la qualité de l'effluent (concentration des eaux traitées pour 3 micro-organismes pathogènes et un indicateur) nécessaires pour respecter le risque acceptable fixé

	Fardeau de la maladie acceptable par année (DALY/personne/année)	Concentration eaux usées (n ^{bre} /l)	Efficacité de traitement nécessaire (log d'enlèvement) ^a	Concentration des eaux traitées (n ^{bre} /l)
Rotavirus	10 ⁻⁶	10 ²	4	10 ⁻²
<i>Campylobacter</i>	10 ⁻⁶	10 ⁴	5	10 ⁻¹
<i>Cryptosporidium parvum</i>	10 ⁻⁶	10 ³	4	10 ⁻¹
Coliformes fécaux	10 ⁻⁶	10 ⁷	5	10 ²

a Conditionnel à l'utilisation d'une source de qualité identique ou meilleure à celle présentée dans ce tableau, et ce pour les différents micro-organismes pathogènes et pour l'indicateur.

Ces exigences de niveau et d'efficacité de traitement et de qualité de l'effluent calculées tiennent lorsque le seul point de contrôle considéré est le traitement des eaux usées. Le risque a été analysé en considérant seulement le **traitement des eaux usées** comme méthode ou comme point de contrôle du risque. La bonification de l'approche de l'OMS par l'analyse de risque dans leurs nouvelles recommandations (2006) a conduit à l'ajout de mesures de protection supplémentaires au traitement permettant l'utilisation d'un effluent de qualité de l'ordre de 10³ coliformes fécaux/100 ml (Option A, voir point 1.2.1)²⁴. On reconnaît que la prévention des risques à la santé liés à la réutilisation des eaux usées peut aussi se faire en examinant et en contrôlant la **qualité de la source** (ex. : charge microbienne des eaux usées municipales) ou en **réduisant l'exposition** en :

- contrôlant les méthodes d'application (type d'irrigation);
- limitant l'accès au terrain irrigué (en établissant par exemple des délais à respecter entre l'irrigation et l'accès du public au terrain ou des distances entre la réutilisation et les habitations et les sources d'eau potable;
- signalant l'utilisation d'eaux usées traitées et en identifiant le matériel utilisé à cet effet^{9,43}.

Il est donc pertinent d'analyser le risque en considérant différents points de contrôle pour ensuite pouvoir le gérer aux étapes et avec les méthodes les plus efficaces pour le réduire^{19,28,43}. Le tableau 19 renseigne sur la réduction de l'exposition pouvant être obtenue avec quelques méthodes.

Tableau 19 Log de réduction de l'exposition aux micro-organismes pathogènes par différentes méthodes de contrôle de l'exposition

Méthode de contrôle de l'exposition	Réduction de l'exposition aux micro-organismes pathogènes (log de réduction)
Irrigation sous la surface d'espaces gazonnés	5-6
Irrigation en goutte-à-goutte	2
Technologie d'irrigation en jet (microjet, etc.)	1
Pas d'accès au public pendant l'irrigation	2
Délai (1 à 4 heures) entre l'irrigation et l'accès aux parcs et terrains de sport	1
Zone tampon (habitation et sources d'eau potable)	1

Tiré de NRMMC et EPHC, 2005⁹.

En appliquant par exemple une restriction de l'accès au public pendant et après (1-4 h) l'irrigation ainsi qu'une zone tampon (4 log de réduction), l'évaluation du risque conduite plus haut donne les résultats décrits au tableau 20.

Tableau 20 Risque pour 3 micro-organismes pathogènes de référence lors d'irrigation urbaine avec des eaux usées traitées selon 3 niveaux différents + contrôle de l'exposition (restriction de l'accès au public pendant et après (1-4 h) l'irrigation + zone tampon : réduction de 4 log)

	Traitement	Rotavirus	<i>Campylobacter</i>	<i>Cryptosporidium parvum</i>
Fardeau de la maladie/ année (DALY/personne/année)	Secondaire	1,672 X 10 ⁻⁷ ou ~ 2 X 10 ⁻⁷	2,555 X 10 ⁻⁷ ou ~ 3 X 10 ⁻⁷	1,939 X 10 ⁻⁷ ou ~ 2 X 10 ⁻⁷
	Secondaire + désinfection	1,672 X 10⁻⁸ ou ~ 2 X 10 ⁻⁸	2,555 X 10⁻¹² ou ~ 3 X 10 ⁻¹²	1,939 X 10⁻⁷ ou ~ 2 X 10 ⁻⁷
	Tertiaire	1,672 X 10⁻¹³ ou ~ 2 X 10 ⁻¹³	2,555 X 10⁻¹² ou ~ 3 X 10 ⁻¹²	6,131 X 10⁻¹¹ ou ~ 2 X 10 ⁻¹¹

Les valeurs en gras correspondent à un risque acceptable tel que défini plus haut dans la présente section. En appliquant ces mesures de réduction de l'exposition, on se situe donc en deçà du 10⁻⁶ DALY (niveau de risque acceptable fixé) pour tous les niveaux de traitement. En fait, sur la base des présentes données, on pourrait se permettre d'effectuer un traitement secondaire si l'on s'assure de faire respecter des mesures de contrôle de l'exposition de manière à la réduire d'au moins 4 log. Des méthodes de contrôle de l'exposition moins élaborées (3 log d'enlèvement, ex. : seulement une restriction de l'accès au public) pourraient être choisies si l'on est assuré de la pleine efficacité du traitement secondaire mis en place par une caractérisation initiale. Cette combinaison de mesures de protection ressemble à celle proposée par l'OMS (option A, point 1.2.1) dans ses nouvelles lignes directrices (2006)²⁴. Ce sont les protozoaires qui dictent l'ampleur des méthodes de contrôle de l'exposition étant donné leur faible sensibilité au traitement secondaire sans désinfection (et même à la désinfection).

Dans le passé, la gestion des risques reliés à l'eau passait surtout par le traitement, mais la reconnaissance de *Cryptosporidium* sp. comme un important pathogène transmis par l'eau et résistant à la désinfection a orienté les efforts de contrôle vers la source d'eau¹² (et l'exposition). Cependant, la gestion du risque par le contrôle de la source et de l'exposition peut être plus laborieuse étant donné qu'elle implique plusieurs personnes et groupes d'intérêts différents¹².

Finalement, il faut garder en tête que le risque calculé ici se surajoute à celui découlant de l'exposition aux mêmes micro-organismes pathogènes par d'autres sources (eau potable, nourriture, contacts interpersonnels, animaux, etc.).

5 CONCLUSION

Avec l'objectif de la réutilisation des eaux usées pour des usages urbains tels que l'irrigation d'espaces gazonnés commerciaux, municipaux ou privés comme les parcs, les terrains de sport, les cours d'école, les cimetières, les terrains de golf et les bordures d'autoroutes :

Si le seul point de contrôle pour minimiser les risques à la santé de la réutilisation des eaux usées pour irrigation municipale est le traitement, un traitement de niveau tertiaire devrait être effectué. Les micro-organismes pathogènes limitant le choix de ce niveau de traitement sont les virus et les parasites, qui sont globalement plus résistants aux différents traitements tout en étant tout de même sensibles aux traitements UV tels qu'utilisés au Québec⁴⁴. Un traitement tertiaire efficace d'une source de qualité similaire à celle considérée dans ce rapport (tableau 13, section 4.2) devrait généralement permettre d'atteindre les critères de qualité de l'effluent (micro-organismes pathogènes et indicateur coliformes fécaux) inscrits ci-dessous (colonne 4) :

Tableau 21 Critères de qualité de l'effluent et efficacité de traitement proposés pour la réutilisation des eaux usées à des fins d'irrigation municipale

Indicateur ou pathogène ^a	Niveau de traitement correspondant ^b	Traitement tertiaire (log d'enlèvement) ^c	Critères de qualité de l'effluent (n ^{bre} /l)
Coliformes fécaux	Secondaire + désinfection	> 6	< 10
Rotavirus	Tertiaire	6	10 ⁻⁴
<i>Campylobacter</i>	Secondaire + désinfection	> 6	< 10 ⁻²
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Tertiaire	4-5	10 ⁻¹

a Log d'enlèvement nécessaire : coliformes fécaux : 5, rotavirus : 4, *Campylobacter* : 5, *Cryptosporidium parvum* : 4, conditionnel à l'utilisation d'une source de qualité identique ou meilleure à celle présentée en caractères gras dans le tableau 13 de la section 4.2, et ce pour les différents micro-organismes pathogènes.

b Les traitements correspondant à ces niveaux sont décrits à la section 4.2.

c Pour l'efficacité des traitements pour les différents micro-organismes pathogènes, voir tableau 14.

L'inclusion d'un critère pour les nématodes, tel que proposé par l'OMS, semble moins appropriée au Québec où ces micro-organismes pathogènes ne sont pas endémiques.

Dans l'éventualité où des mesures de minimisation du risque comme le contrôle de l'exposition sont ajoutées au traitement, le niveau de ce dernier ainsi que les critères de qualité de l'effluent pourraient être assouplis (tableau 22).

Tableau 22 Critères de qualité de l'effluent et efficacité de traitement proposés pour la réutilisation des eaux usées à des fins d'irrigation municipale lorsqu'un contrôle de l'exposition est surajouté

Indicateur ou pathogène ^a	Traitement tertiaire (log d'enlèvement) ^b	Critères de qualité de l'effluent (n ^{bre} /l)	Mesures de contrôle de l'exposition (log d'enlèvement) ^c	Traitement secondaire (log d'enlèvement) ^b	Critères de qualité de l'effluent (n ^{bre} /l) ^d
Coliformes fécaux	> 6	< 10	4 ^e	1-3	10 ⁴
Rotavirus	6	10 ⁻⁴	4 ^e	0-2	1
<i>Campylobacter</i>	> 6	< 10 ⁻²	4 ^e	1-3	10 ¹
<i>Crypto. parvum</i>	4-5	10 ⁻¹	4 ^e	0,5-1	10 ²

a 1 = Log d'enlèvement nécessaire : coliformes fécaux : 5, rotavirus : 4, *Campylobacter* : 5, *Cryptosporidium parvum* : 4, conditionnel à l'utilisation d'une source de qualité identique ou meilleure à celle présentée en caractères gras dans le tableau 13 de la section 4.2, et ce pour les différents micro-organismes pathogènes.

b Pour l'efficacité des traitements pour les différents micro-organismes pathogènes, voir tableau 14, section 4.2.

c Voir tableau 19, section 4.4.

d Critères de qualité fixés pour assurer un maximum d'efficacité du traitement secondaire.

e Pas d'accès au public pendant et après l'irrigation (1 à 4 heures) + zone tampon = 4 log d'enlèvement.

Donc, si des mesures de contrôle de l'exposition comme celles présentées au tableau 22 sont ajoutées, un traitement de niveau secondaire pourrait être utilisé. Les différentes mesures de contrôle de l'exposition présentées au tableau 19 de la section 4.4 peuvent être utilisées jumelées à un des niveaux de traitement présentés au tableau 14 de la section 4.2, dans la mesure ou au moins 4 log d'enlèvement de rotavirus, 5 log d'enlèvement de coliformes fécaux et de *Campylobacter* et 4 log de *Cryptosporidium parvum* sont assurés par la combinaison. Il est important de rappeler que ces niveaux d'enlèvement calculés sont conditionnels à l'utilisation d'une source de qualité identique ou supérieure à celle considérée dans ces calculs et ce, pour les différents micro-organismes pathogènes. Une source de qualité moindre pourrait nécessiter un enlèvement plus important et donc un niveau de traitement plus élevé (et des critères de qualité de l'effluent plus sévères), des mesures de contrôle de l'exposition plus nombreuses ou plus efficaces.

Les mesures de contrôle proposées semblent plus sévères que celles appliquées à la baignade en eau douce. Elles sont cependant conformes à ce qui est proposé au niveau international et elles tiennent compte du fait que le risque pour la population est involontaire et que la population ne tire aucun bénéfice de l'exposition.

5.1 VARIABILITÉ ET INCERTITUDES

Il s'agit d'une estimation du risque déterministe, avec les limites que cela comporte. Entre autres, il est difficile d'avoir une idée sur le degré de conservatisme de l'analyse. Les scénarios testés ne se présenteront peut-être jamais²¹. Cependant, il est important d'identifier les différentes incertitudes reliées à l'exercice réalisé. Certaines sont plus générales à l'analyse de risque microbiologique et ont été mentionnées plus haut (immunité, transmission secondaire). L'utilité de cet exercice repose sur la qualité et l'utilisation adéquate des modèles et paramètres disponibles. Différents modèles dose-réponse existent pour un même pathogène, ex. : *Cryptosporidium*^{9,36}. La disponibilité de données locales est parfois restreinte, par exemple pour : les micro-organismes pathogènes significatifs, le fardeau de la maladie reliée à un pathogène, le ratio infection/maladie, mais surtout pour les variables de l'exposition comme les concentrations en micro-organismes pathogènes et indicateurs des eaux usées brutes et traitées au Québec. Tous les facteurs non considérés énumérés plus haut sont aussi une limite à notre analyse.

Il y a donc plusieurs limites à l'analyse du risque microbiologique en général et à cette analyse en particulier, mais elle est tout de même utile pour comparer les niveaux de risque de différentes pratiques, approches ou solutions et pour interpréter les données locales recueillies¹⁹.

6 RECOMMANDATIONS

Une caractérisation initiale de l'effluent pour s'assurer du bon fonctionnement d'un plan de traitement devrait toujours être réalisée⁴⁵. Minimalement, elle peut porter sur les micro-organismes pathogènes et indicateurs mentionnés ci-dessus (rotavirus, *Campylobacter*, *Cryptosporidium parvum*, coliformes fécaux). Une surveillance continue de l'efficacité du traitement et de la qualité de l'effluent doit aussi être faite⁴⁵.

La gestion du risque doit se faire en prenant en considération l'évaluation des risques mais également des autres variables telles que les considérations sociales, économiques, politiques et techniques³⁰ particulières à une région donnée.

Finalement, l'analyse quantitative de risque microbiologique étant un sujet actuellement en pleine évolution, un suivi de la littérature s'impose pour être bien au fait des connaissances récentes. De plus, tel que déjà mentionné, elle doit également reposer sur des données locales, aussi des efforts de recherche seraient notamment souhaitables sur les sujets suivants :

- La caractérisation microbiologique des eaux usées;
- Les indicateurs les plus appropriés pour effectuer la surveillance de la qualité des eaux usées en rapport avec la présence virale et de parasites;
- Les principaux micro-organismes pathogènes transmis par la réutilisation des eaux usées¹³;
- L'efficacité des mesures pour abaisser l'exposition (type d'irrigation, délai entre l'irrigation et l'accès au public, zone tampon).

RÉFÉRENCES

1. Lazarova V, Levine B, Sack J, Cirelli G, Jeffrey P, Muntau H, Salgot M, Brissaud F (2001) "Role of water reuse for enhancing integrated water management in Europe and Mediterranean countries". *Water Science and technology* 43(10):25-33.
2. U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Agency for International Development (2004) "Guidelines for Water Reuse". Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency and U.S. Agency for International Development, 445 p.
3. Australian Academy of Technological Sciences and Engineering (2004) "Water recycling overseas". In: *Water recycling in Australia*. Australia: Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, p. 21-46.
4. Organisation for Economic Co-operation and Development (2005) "Expert meeting-emerging risk to water supplies-best practice for improved management and preparedness to protect public health". France: OECD, 37 p.
5. World Health Organization (1989) "Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture: measures for public health protection-Executive Summary". Geneva: WHO, 20 p.
6. Westrell T, Schönning C, Stenström TA, Ashbolt NJ (2004) "QMRA (Quantitative microbial risk assessment) and HACCP (Hazard analysis and critical control points) for management of pathogens in wastewater and sewage sludge treatment and reuse". *Water Science and technology* 50(2):23-30.
7. Crook J (1998) "Water Reclamation and Reuse Criteria" In: *Wastewater reclamation, recycling and reuse*. Ed. Asano T. Vol. 10. New York: V, p. 627-703.
8. Yates MV, Gerba CP (1998) "Microbial considerations in wastewater reclamation and reuse". In: *Wastewater reclamation, recycling and reuse*. Ed. Asano T. Vol. 10. New York: CRC Press, p. 437-488.
9. Natural Resource Management Ministerial Council, and the Environment Protection and Heritage Council (2005) "National guidelines for water recycling-managing health and environmental risks-Draft for public consultation". Australia: Natural Resource Management Ministerial Council and the Environment Protection and Heritage Council, 353 p.
10. Bitton G. (2005) "Wastewater microbiology", third edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., p. 109-163, 548-561 and 213-222.
11. Chevalier P. (2004) « Avis scientifique sur les risques à la santé découlant de l'épandage de matières résiduelles fertilisantes (MRF) ». document non publié, 50 p.
12. Medema GJ, Shaw S, Waite M, Snozzi M, Morreau A, Grabow W (2003) "Catchment characterization and source water quality". In: *Assessing microbial safety if drinking water: Improving approaches and methods*. London: for the World Health Organization and the Organisation for Economic Co-operation and Development, IWA Publishing, p. 111-158.

13. Payment P, Pintar K 2006 Waterborne pathogens: A critical assessment of methods, results and data analysis. *Revue des sciences de l'eau* 19(3):233-245.
14. Cooper RC, Olivieri AW (1998) "Infectious Disease Concerns in Wastewater Reuse". In: *Wastewater reclamation, recycling and reuse*. Ed. Asano T. Vol. 10. New York: CRC Press, p.489-520.
15. Payment P, Waite M, Dufour A 2003 "Introducing parameters for the assessment of drinking water quality", p. 47-77, In *Assessing microbial safety of drinking water: Improving approaches and methods*. Edited by Dufour A, Snozzi M, Koster W, Bartram J, Ronchi E, Fewtrell L. WHO Drinking Water Quality Series, OECD – WHO, Paris, France : IWA Publishing, London.
16. Groupe scientifique sur l'eau (2004) « Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine (fiches sur les coliformes totaux, les coliformes fécaux et l'*Escherichia coli* ». Québec, Institut national de santé publique du Québec.
17. Blumenthal UJ, Mara DD, Peasey A, Ruiz-Palacios G, Stott R (2000) "Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines: Environment and health". *Bulletin of the World Health Organization* 78(9):1104-1116.
18. Schwartzbrod L (2000) « Virus humains et santé publique : conséquences de l'utilisation des eaux usées et des boues en agriculture et conchyliculture ». Nancy, France : Centre collaborateur OMS pour les micro-organismes dans les eaux usées, Université de Nancy, 292 p.
19. Haas CN, Rose JB, Gerba CP (1999) "Quantitative microbial risk assessment". New York: John Wiley & Sons, Inc., p. 1-127.
20. Payment P (2003) « Enlèvement des micro-organismes pathogènes et des bactéries indicatrices par les stations de traitement des eaux usées municipales situées sur la rivière des Mille Îles, Rapport présenté au Ministère de l'Environnement du Québec, Programme d'aide à la recherche et au développement en environnement (PARDE), Projet no : 3336.11.00.01 ». Québec : Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Institut Armand-Frappier, 122 p.
21. Petterson SA, Ashbolt NJ (2003) "WHO Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture: Microbial risk assessment section." Geneva: World Health Organization, 36 p.
22. Anderson J, Adin A, Crook J, Davis C, Hultquist R, Jimenez-Cisneros B, Kennedy W, et al. (2001) "Climbing the ladder: a step by step approach to international guidelines for water recycling". *Water Science and Technology* 43(10):1-8.
23. Sakaji RH, Funamizu N (1998) "Microbial risk assessment and it's role in the development of wastewater reclamation policy". In: *Wastewater reclamation, recycling and reuse*. Ed. Asano T. Vol. 10. New York: CRC Press, p. 705-755.

24. World Health Organization (2006) "Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater-Volume 2 Wastewater use in agriculture". [en ligne].
http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuww/en/index.html
(consulté le 1^{er} juillet 2006).
25. World Health Organization (2006) "Health-based targets". In: *Guidelines for drinking-water quality incorporating first addendum*. Geneva: WHO, p. 37-47.
26. Gerba CP, Rose JB (2003) "International guidelines for water recycling: microbiological considerations". *Water Science and Technology: Water Supply* 3(4): 311-316.
27. Crook J, Surampalli RY (2005) "Water reuse criteria in the United States". *Water Science and Technology: Water Supply* 5(3-4):1-7.
28. Marsden Jacob Associates (2005) "National guidelines on water recycling-managing health and environmental risks-impact assessment". Australia: Natural Resource Management Ministerial Council, and the Environment Protection and Heritage Council, p. 12-18 + addenda A.
29. Mediterranean Action Plan (2005) "Guidelines for municipal water reuse in the Mediterranean region." Athena, Greece: United Nations Environment Program, in collaboration with the World Health Organization, 59 p.
30. Angelakis AN, Marecos Do Monte MHF, Bontoux L, Asano T (1999) "The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines". *Water Research* 33(10):2201-2217.
31. Bontoux L (1998) "The regulatory status of wastewater reuse in the European Union". In: *Wastewater reclamation, recycling and reuse*. Ed. Asano T. Vol. 10. New York: CRC Press, p. 1463-1475.
32. British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks (2001) "Municipal sewage regulation-code of practice for the use of reclaimed water-A companion document to the municipal sewage regulation", C.-B.: British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks, Pollution Prevention and Remediation Branch, 41 p.
33. Alberta Environment (2000) "Guidelines for municipal wastewater irrigation". Alberta : Alberta Environment, Municipal Program Development Branch, Environmental Sciences Division, Environmental Service, 24 p.
34. Health Canada and the Ontario Ministry of the Environment (2006) *Meeting report: Expert workshop on quantitative microbiological risk assessment (Toronto, 24-25 January 2006)*. Toronto, 20 p.
35. Hunter PR, Payment P, Ashbolt N, Bartram J (2003) "Assessment of risk". In: *Assessing microbial safety of drinking water: Improving approaches and methods*. London: for the World Health Organization and the Organisation for Economic Co-operation and Development, IWA Publishing, p. 79-114.
36. World Health Organization (2006) "Microbial aspects". In: *Guidelines for drinking-water quality incorporating first addendum*. Geneva : WHO, p. 121-144c.

37. Agence de santé publique du Canada (2000) « Écllosion de gastro-entérite d'origine hydrique associée à un réseau d'aqueduc municipal contaminé, Walkerton (Ontario), mai-juin 2000 ». Dans : *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 26(20):170-173.
38. Ministère de la Santé et des Services sociaux (2005) « Surveillance des maladies à déclaration obligatoire au Québec-Rapport annuel 2002 ». Québec : Direction des communications du Ministère de la Santé et des Services sociaux, 118 p.
39. Payment P, Hunter PR (2001) "Endemic and epidemic infectious intestinal disease and its relationship to drinking water". In: *Water quality-guidelines, standards and health: Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease*. Eds Fewtrell Lorna and Jamie Bartram. London: for the World Health Organization, IWA Publishing, p. 61-88.
40. Dowd SE (2002) "Wastewater and biosolids as sources of airborne microorganisms". In: *Encyclopedia of environmental microbiology*. Ed Bitton. SI: G., John Wiley & Sons, Inc.
41. Institut de la statistique du Québec (2005) « Population par année d'âge et par sexe, Québec, 1^{er} juillet 2005 ». [en ligne].
http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/struc_poplt/201_05.htm
(consulté le 10 août 2006).
42. Havelaar AH, Melse JM (2003) "Quantifying public health risk in the WHO guidelines for drinking-water quality-A burden of disease approach". SI: WHO and The Netherlands Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment, Directorate General for Environmental Protection, Directorate for Soil, Water and Countryside within the framework of project 734301, Standards and enforcement of drinking water regulations, 49 p.
43. Salgot M, Vergés C, Angelakis AN (2003) "Risk assessment in wastewater recycling and reuse". *Water Science and Technology: Water Supply* 3(4):301-309.
44. LeChevallier MW, Au KK (2004) "Water treatment and pathogen control - Process efficiency in achieving safe drinking water" for the WHO, by IWA Publishing, London.
45. World Health Organization (2006) "The Guidelines: a framework for safe drinking-water". In: *Guidelines for drinking-water quality incorporating first addendum*. Geneva: World Health Organization, p. 22-36.
46. Nurizzo C (2003) "Reclaimed water reuse in the Mediterranean Region: Some considerations on water resources, standards and bacterial re-growth phenomena". *Water Science and Technology: Water Supply* 3(4): 317-324.

AUTRES RÉFÉRENCES

Asano T, Levine AD (1998) "Wastewater reclamation, recycling, and reuse : An introduction". In: *Wastewater reclamation, recycling and reuse*. Ed. Asano T. Vol. 10. New York: CRC Press, p. 1-55.

Barbagallo S, Cirelli GL, Indelicato S (2001) "Wastewater reuse in Italy". *Water Science and Technology* 43(10):43-50.

Exall K, Marsalek J. Schaefer K (2004) "A review of water reuse and recycling, with reference to Canadian practice and potential: 1. Incentives and implementation". *Water Quality Research Journal* 39(1):1-12.

Gauvin D (2006) « Avis sur la réutilisation d'effluents de stations de traitement d'eaux usées domestiques pour l'irrigation d'un terrain de golf ». Québec : Institut national de santé publique du Québec, 8 p.

Odendaal PE, van der Westhuizen JLJ, Grobler GJ (1998) "Wastewater reuse in South Africa". In: *Wastewater reclamation, recycling and reuse*. Ed. Asano T. Vol. 10. New York: CRC Press, p. 1163-1169.

Ogoshi M, Suzuki Y, Asano T (2001) "Water reuse in Japan". *Water Science and Technology* 43(10):17-23.

State of California, Department of Health Services, Sanitary Engineering Section (1978) "Wastewater reclamation criteria-An Excerpt from the California Administrative Code Title 22, Division 4 Environmental Health". In: *Wastewater reclamation, recycling and reuse*. Ed. Asano T. Vol. 10. New York: CRC Press, p. 1477-1490.

ANNEXE 1

Tableau 23 Recommandations pour la réutilisation des eaux usées en France (1991)

WATER QUALITY	CRITERIA	IRRIGATION TYPE	TYPE OF VEGETATION	TREATMENT
A	None	On-surface or subsurface trickle irrigation	Cereals, industrial crops, fodder Fruit trees Forest and green areas with restricted access	-
B	≤ 1 helminth egg/L (Taenia, Ascaris)	Surface or furrow irrigation Spray irrigation if aerosol propagation limited: setback distances from residential areas > 100 m, hedges, etc.	Fruit trees, cereals and fodder, nurseries and food crops eaten cooked Sport fields if irrigation is stopped several weeks before access	Stabilization ponds >10 days retention time or equivalent
C	≤ 1 helminth egg/L (Taenia, Ascaris) $\leq 10^3$ FC/100 mL	Irrigation methods with limited contact with crops: low pressure sprinklers, surface irrigation, furrows Setback distances from residential areas > 100 m	Fruit trees, pasture, food crops eaten raw, etc. Sport fields, golf courses, green areas with open access	Stabilization ponds >30 days retention time or equivalent

Note that the new French draft regulations (November 2000) are based on the following criteria:

(a) Secondary treatment (EU Directive, 1991):

SS < 35 mg/L and total COD < 125 mg/L, for lagoon effluents: SS < 150 mg/L, dissolved COD < 125 mg/L, *Escherichia coli* < 1000/100 mL, and no *Salmonella* and *Taenia* egg.

(b) Setback distances (from roads, houses, ...) ≥ 50 m.

(c) Spray irrigation during off-hours. Low range sprinklers are recommended.

(d) Sub-surface irrigation was not taken into account.

Tiré du Mediterranean Action Plan, 2005²⁹.

Tableau 24 Critères de qualité pour la réutilisation des eaux usées en Andalousie, Espagne (1994)

Type d'application	Coliformes fécaux (par 100 ml)	Nématodes œufs (par litre)
Irrigation de terrains de sport et de parcs avec accès public	< 200	< 1
Légumes consommés crus	< 1 000	< 1
Production de biomasse consommée par les humains, réfrigération en circuit ouvert	< 1 000	0
Lacs récréatifs	< 2 000	< 1
Réfrigération en circuit semi-fermé	< 10 000	0
Cultures industrielles, céréales, graines de fourrage sèches, forêts, légumes conservés ou consommés cuits	0	< 1
Irrigation d'espaces verts sans accès public, production de biomasse non consommée par les humains, lacs récréatifs avec accès interdit	0	0

Adapté de Bontoux, 1998³¹ et du Mediterranean Action Plan, 2005²⁹.

Tableau 25 Critères pour la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation en Israël

Parameters	Group of crops/main crops			
	A Cotton, sugar beet, cereals, dry fodder seeds, forest irrigation, etc.	B Green fodder, olives, peanuts, citrus, bananas, almonds, nuts, etc.	C Deciduous fruits ^b conserved vegetables, cooked and peeled vegetables, green belts, football fields and golf courses	D Unrestricted crops, including vegetables eaten uncooked (raw), parks and lawns
<i>Effluent quality</i>				
BOD ₅ total (mg/l)	60 ^a	45 ^a	35	15
BOD ₅ dissolved (mg/l)	—	—	20	10
Suspended solids (mg/l)	50 ^a	40 ^a	30	15
Dissolved oxygen (mg/l)	0.5	0.5	0.5	0.5
Coliforms counts (/100 ml)	—	—	250	12 (80%) 2.2 (50%)
Resid. avail. chlorine (mg/l)	—		0.15	0.5
<i>Mandatory treatment</i>				
Sand filtration or equivalent	—		—	required
Chlorination (minimum contact time, min)	—		60	120
<i>Distances</i>				
From residential areas (m)	300	250	—	—
From paved road (m)	30	25	—	—

^aDifferent standards will be set for stabilization ponds with retention time of at least 15 days. ^bIrrigation must stop 2 weeks before fruit picking; no fruit should be picked from the ground.

Tiré de Angelakis *et al.*, 1999³⁰.

Tableau 26 Standards microbiologiques de réutilisation régionaux actuels (1989) et nationaux proposés (2002) en Italie

	Oeufs d'helminthes (n/l)(viable)	Salmonelles (ufc/100 ml)	<i>E. coli</i> (ufc/100 ml)	Coliformes fécaux (ufc/100 ml)	Coliformes totaux (mpn/100 ml)
Standards actuels (Sicile, 1989)	1	absent	-----	1 000	3 000
Standards proposés (MEV, 2002)	-----	absent	10 pour 80 % échantillons, max.100	-----	-----

Tiré de Nirizzo, 2003⁴⁶.

