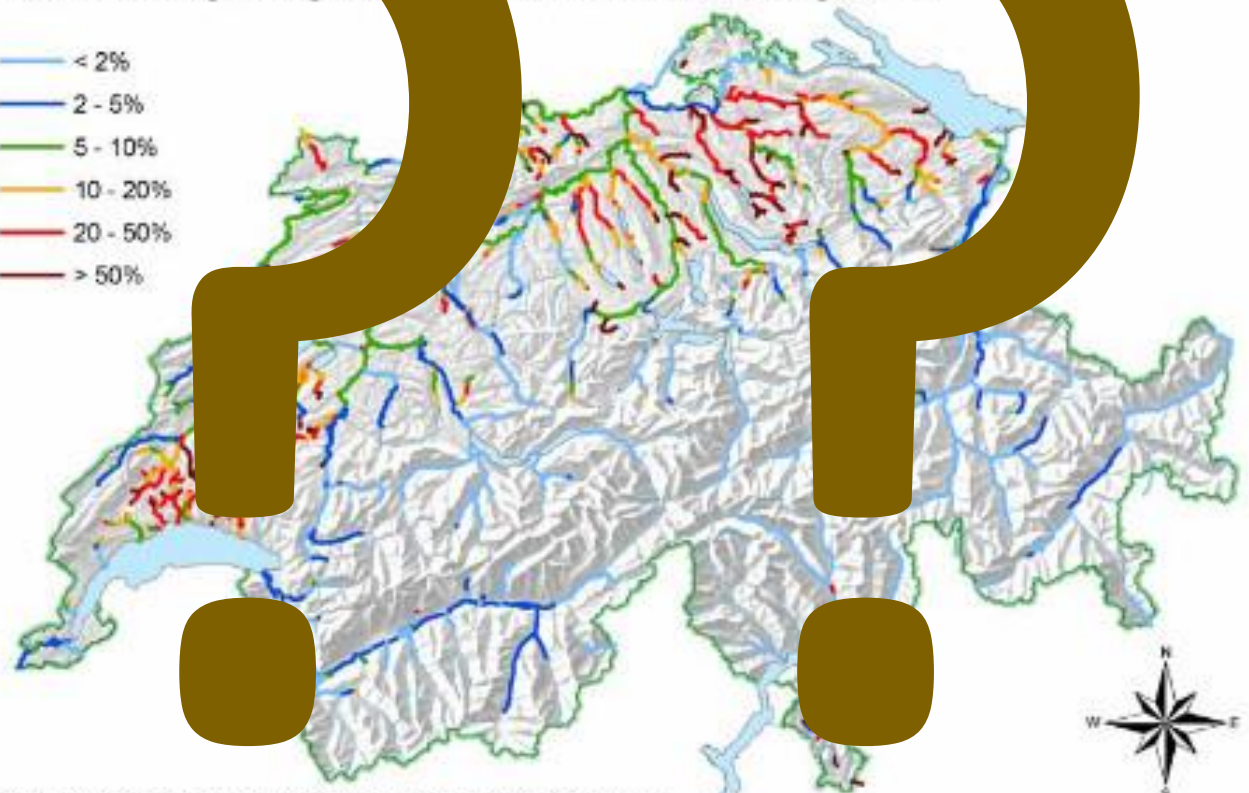




Prozentanteil gereinigtes Wasser an der Abflussmenge Q347

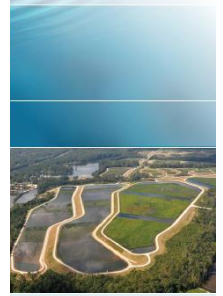
- < 2%
- 2 - 5%
- 5 - 10%
- 10 - 20%
- 20 - 50%
- > 50%



Gewässerlinien: VECTOR25 © swisstopo (DV002232.1)
Kartenhintergrund © 2004, swisstopo



Proportion d'eaux usées dans les rivières Suisses
(Abegglen and Siegrist, 2012)



USAID
UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT

CDM Smith

Chapter 4 | State Regulatory Programs for Water Reuse

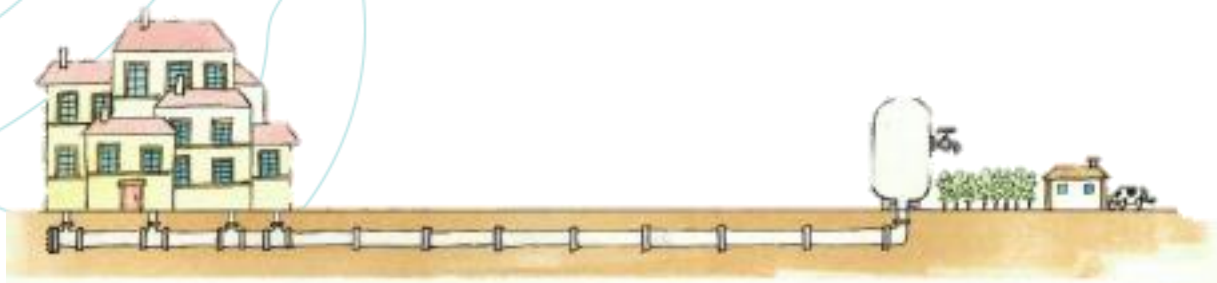
- weekly
-) - weekly
- idity - continuous
- al coliform - daily
- esidual - continuous

Agricultura

Food Crops ¹⁵
The use of reclaimed surface or spray irrigation for crops which are intended for human consumption, consumption

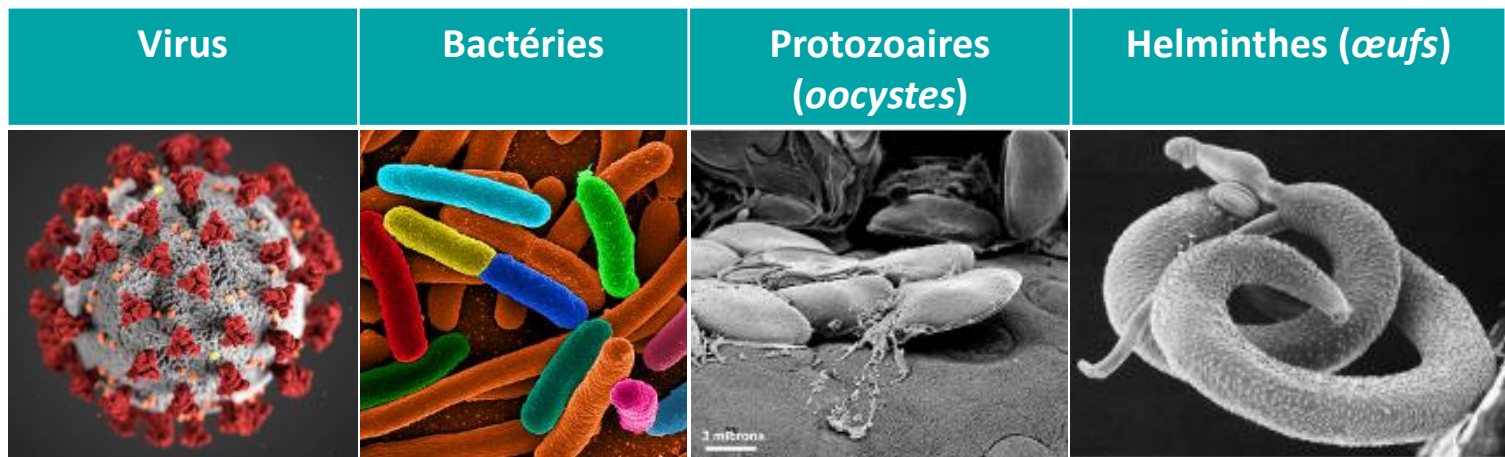


➤ Evolutions de la gestion des risques sanitaires associés aux germes pathogènes dans la construction des réglementations sur la REUSE



Le Merdoduc (Panicot & Bouchet, 2015)

➤ Microorganismes pathogènes et eaux usées



Covid-19 (CDC, 2020)

Escherichia coli (Wiki Commons)

Giardia (Erlandsen, 2017)

Schistosoma mansoni (Reynolds, 2012)

Taille μm	0,01 – 0,35	0,2 – 10	3 – 30 (2 – 15)	> 1000 (40)
Concentrations dans les EUB (UFC 100mL)	100 – 10 ⁵	10 ³ - 10 ⁹	10 - 10 ⁵	100 - 10 ⁴
Dose minimale infectieuse	100 à 10 ³	100 à 10 ⁶	10 à 100	1 à 10
Pathologies	Covid, Hépatites	Diarrhée, Typhoïde, Cholera	Diarrhée, Cryptosporidiose, Toxoplasmose	Ascariose, Tenia

EUB : eaux usées brutes

Sources : Asano et al., 1998 ; US National Research Council, 2004 ; Beupoil et al., 2010

➤ Champs d'épandage XIXème

TABLE 1 | Selected early land treatments and reuse systems.

Location	Date started	Type of land based system	Area (1,000 ha)	Flow (m ³ /d)
EUROPE				
Bunzlau, Poland	1531	Sewage farms		
Edinburgh, UK ^a	1650	Sewage farms		
Croydon-Beddington, UK	1860	Sewage farms	0.25	17.4
Paris, France	1869	Irrigation	0.64	30.3
Leamington, UK	1870	Sewage farms	0.16	3.4
Berlin, Germany	1874	Sewage farms	2.7	N/A
Milan, Italy	1881	Irrigation	3.5	
Wroclaw, Poland	1882	Sewage farms	0.80	10.6
Braunschweig, Germany	1896	Sewage farms	4.4	60.0
USA				
Augusta, ME	1876	Irrigation		
Calumet City, MI	1888	Irrigation	0.005	
South Framingham, MA	1889	Irrigation		
Woodland, CA	1889	Irrigation	0.07	15.5
Boulder, CO	1890	Irrigation		
Fresno, CA	1891	Irrigation	1.60	10.6
San Antonio, TX	1895	Irrigation	1.60	75.7
Vineland, NJ	1901	Rapid infiltration system	0.0026	3405.9
Ely, NV	1908	Irrigation	0.16	6.1
Lubbock, TX	1915	Irrigation		
OTHERS				
Tula (Mezquital) Valley ^b , Mexico	1896	Irrigation	90.00	
Melbourne, Australia	1897	Irrigation	4.16	189.3

Adapted from Metcalf and Eddy Inc. (1991); Jimenez and Asano (2008), Reed and Crites (1984), Angelakis et al. (2017), and Tzanakakis et al. (2014).

^aThe value of wastewater as a fertilizer was well-recognized in 1650.

^bThe initial irrigated area was of < 2,000 ha but currently is of 90,000 ha after reaching a maximum of 110,000 ha in 1995.

Cholera Fr :

- 1932 : 100 000 / 32 ,5 millions
- 1849 : 100 000 / 35 millions
- 1854 : 145 000 / 35,5 millions

Reuse région parisienne début XXème :
5 260 ha irrigués à partir de la station de pompage de Colombes

> XXème

1918 : Californie, reuse pour les cultures non alimentaires, ou cultures cuites, interdiction de la reuse EUB

1968 : Windhoek (Namibie) : production indirecte d'eau potable

1973 : Guidelines OMS (8 experts, 30/11/71 – 6/12/71) ,
irrigation sans restriction < 100 coliformes totaux / 100 mL : traitement
secondaire + chloration

Potabilisation : 0 coliforme totaux / 100 mL + 0 virus / 1000 mL

1978 : Californie, irrigation sans restriction < 2,2 CT/100 mL

1978 : Israël, irrigation sans restriction < 12 CT/100 mL > 80% échantillons, <
2,2 CT/100 mL > 50% des échantillons

Barrières complémentaires : types de cultures et zones tampons

1981 : Noiremoutier, démarrage de la REUT pour la production de pdt

1983 : Floride : 0 CT/100 mL pour les cultures consommées crues

1984 : Arizona : irrigation sans restriction : 1 virus/40 L, *Giardia* 1 cyste/40L

➤ Guidelines OMS 1989

- Passage des critères microbiologiques aux critères épidémiologiques
- Synthèse des données épidémiologiques

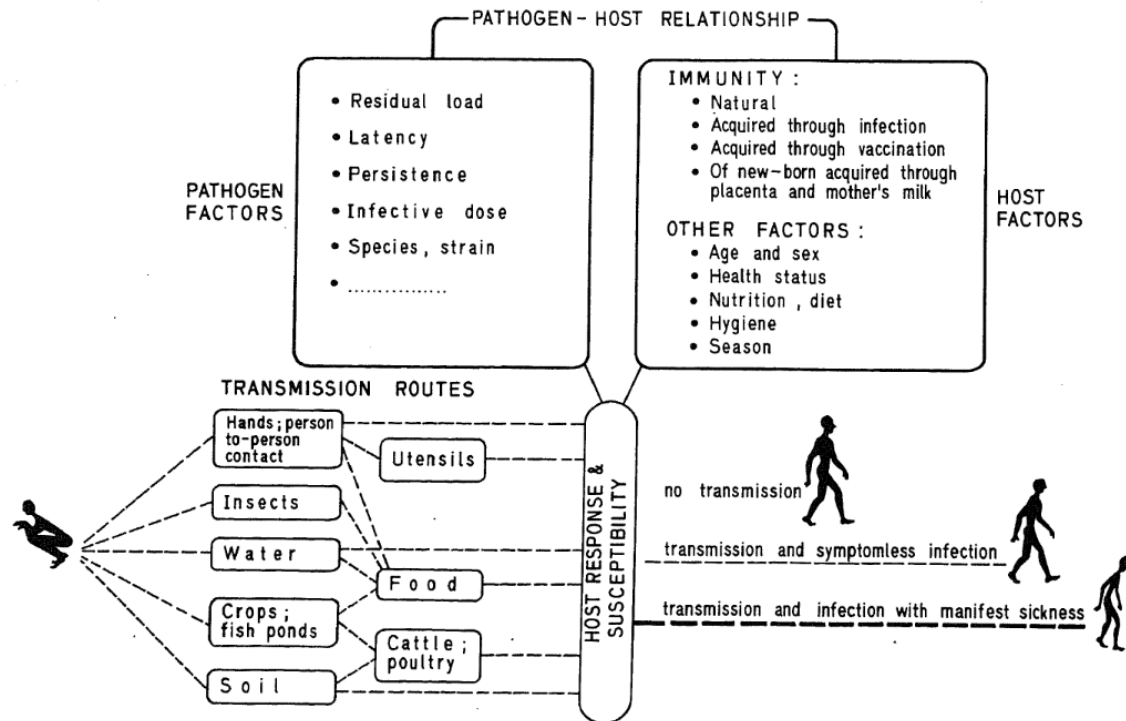
Relative Health Risks from Use of Untreated Excreta and Wastewater in Agriculture and Aquaculture

Class of pathogen	Relative amount of excess frequency of infection or disease
1. Intestinal nematodes: <i>Ascaris</i> <i>Trichuris</i> <i>Ancylostoma</i> <i>Necator</i>	High
2. Bacterial infections: bacterial diarrhoeas (e.g. cholera) typhoid	Lower
3. Viral infections: viral diarrhoeas hepatitis A	Least
4. Trematode and cestode infections: schistosomiasis clonorchiasis taeniasis	From high to nil, depending upon the particular excreta use practice and local circumstances

➤ Guidelines OMS 1989

- Passage des critères microbiologiques aux critères épidémiologiques
- Synthèse des données épidémiologiques
 - Relation hôte-pathogène

The Pathogen-Host Relationship and Possible Transmission Routes for Excreta-Related Infections



➤ Guidelines OMS 1989

- Passage des critères microbiologiques aux critères épidémiologiques
- Synthèse des données épidémiologiques
 - Relation hôte-pathogène
 - (Qualité moyenne des eaux des rivières)

Tableau 4. Nombres de coliformes dans des eaux de rivières*

Nombre par 100 ml	Nombre de rivières par région			
	Amérique du Nord	Amérique centrale et du Sud	Europe	Asie et Pacifique
< 10	8	0	1	1
10–100	4	1	3	2
100–1000	8	10	9	14
1000–10 000	3	9	11	10
10 000–100 000	0	2	7	2
> 100 000	0	2	0	3
Nombre total de rivières	23	24	31	32

* Source: Référence (23). On n'a pas de données sur les cours d'eau africains.

→ *Global pollution and health. Results of health-related environmental monitoring.* OMS/PNUD, 1987

➤ Guidelines OMS 1989

Tableau 3. Directives concernant la qualité microbiologique des eaux usées utilisées dans l'agriculture*

Catégorie	Conditions de réutilisation	Groupe exposé	Nématodes intestinaux (nombre d'œufs par litre – moyenne arithmétique)*	Coliformes intestinaux (nombre par 100 ml – moyenne géométrique)*	Procédé de traitement susceptible d'assurer la qualité microbiologique voulue
A	Irrigation de cultures destinées à être consommées crues, des terrains de sport, des jardins publics ^d	Ouvriers agricoles, consommateurs, public	≤ 1	≤ 1000	Une série de bassins de stabilisation conçus de manière à obtenir la qualité microbiologique voulue ou tout autre procédé de traitement équivalent
B	Irrigation des cultures céréalières, industrielles et fourragères, des pâturages et des plantations d'arbres	Ouvriers agricoles	≤ 1	Aucune norme n'est recommandée	Rétention en bassins de stabilisation pendant 8–10 jours ou tout autre procédé d'élimination des helminthes et des coliformes intestinaux
C	Irrigation localisée des cultures de la catégorie B, si les ouvriers agricoles et le public ne sont pas exposés	Néant	Sans objet	Sans objet	Traitement préalable en fonction de la technique d'irrigation, mais au moins sédimentation primaire

*Dans certains cas, il faut tenir compte des conditions locales épidémiologiques, socio-culturelles et environnementales et modifier les directives en conséquence.

^aEspèces *Ascaris* et *Trichuris* et ankylostomes.

^bPendant la période d'irrigation.

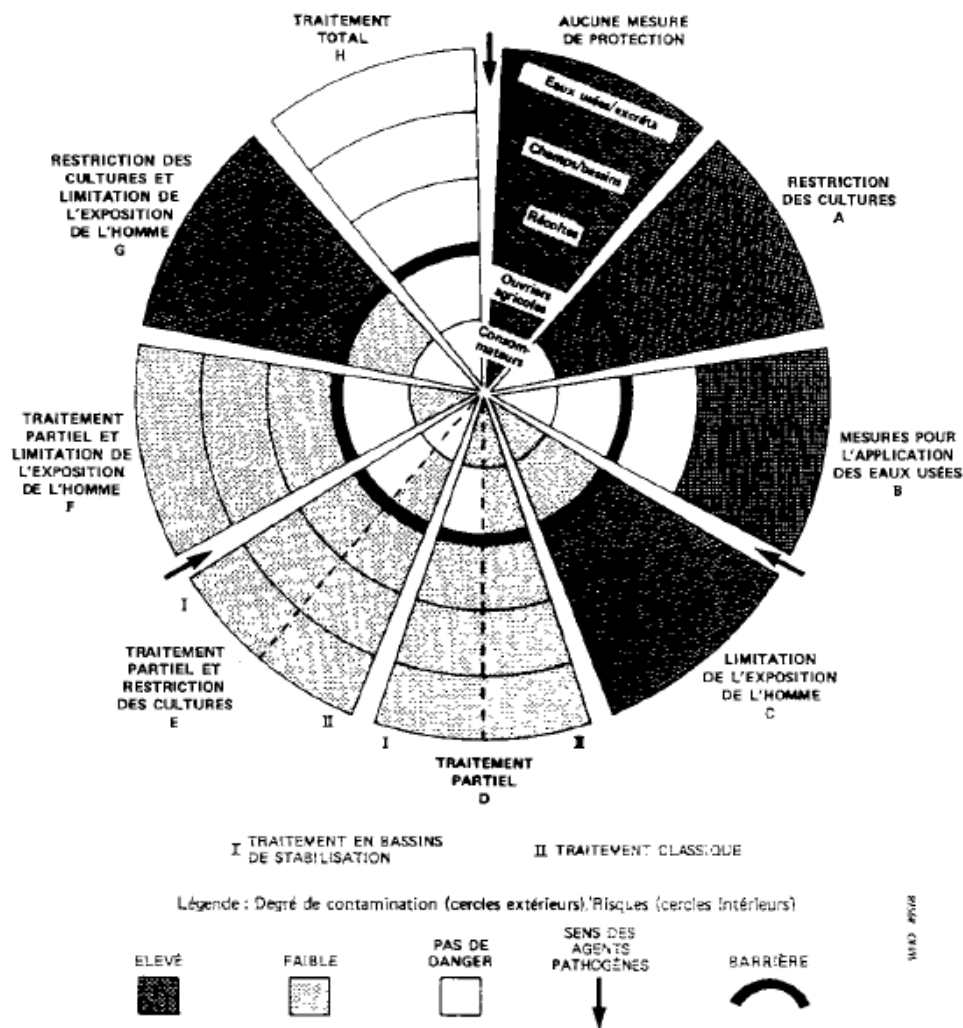
^cUne directive plus stricte (≤ 200 coliformes intestinaux par 100 ml) est justifiée pour les pelouses avec lesquelles le public peut avoir un contact direct, comme les pelouses d'hôtels.

^dDans le cas des arbres fruitiers, l'irrigation doit cesser deux semaines avant la cueillette et les fruits tombés ne doivent jamais être ramassés. Il faut éviter l'irrigation par aspersion.

➤ Guidelines OMS 1989

Fig. 5. Modèle généralisé illustrant l'effet de différentes mesures de prévention des risques pour la santé liés à la réutilisation des eaux usées

Formalisation de l'approche multi-barrières



INRAE

Evolution gestion des risques sanitaire

19/10/21 – Séminaire Reuse 2021

W182 #10/8

> 90's

1989 : Révision des Guidelines OMS (13 experts, 18/11/87 – 23/11/87)

1989 : Réglementation Tunisienne basée sur les directives OMS 1989

1991 : Recommandations du ministère de la Santé pour la réutilisation des eaux usées (circulaire n°51 du 22 juillet 1991) basée sur les directives OMS.

1992 : US EPA Guidelines, reuse agricole : 0 CT/100 mL

Shuval et al. (1997) : risques associés à la consommation de légumes consommés crus produits avec EUT respectant les directives OMS de 10^{-5} à 10^{-7}
Atteindre le niveau USEPA : 3 à 30 millions \$ / cas évité

1999 : Israël révision de la réglementation : <1 CF/100 mL pour les cultures consommées crues + approche multi-barrières

➤ Guidelines OMS 2006

Valeur eau potable
Cancer 1/100 000

→ Passage d'une approche épidémiologique à une approche prédictive /
modélisation du risque

Risque sanitaire tolérable

DALY

Années de vies corrigées de
l'incapacité

10^{-6} DALY pppa

QMRA
Quantitative Microbiological Risk
Assessment

Identification des dangers

← Rotavirus ($5 \cdot 10^3/L$)

Caractérisation des dangers

Evaluation expositions

Caractérisation des risques

→ $6 - 7 \log_{10} E.coli$

Gestion des risques

Approche Multi-barrières

➤ Approche Multi-barrières

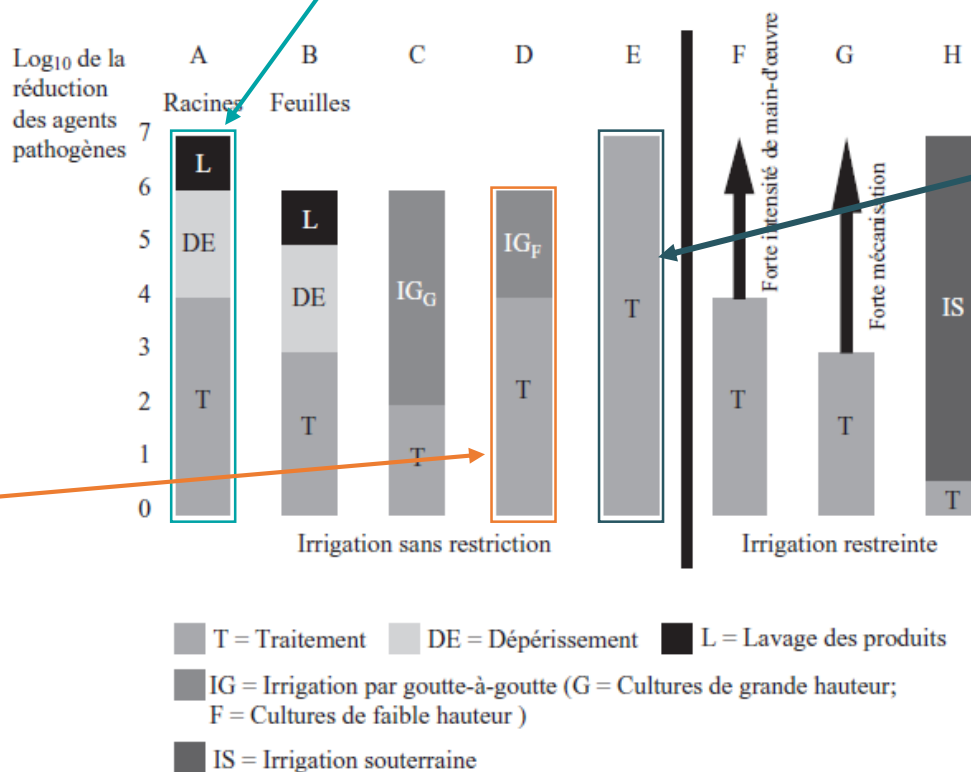
Directive OMS REUSE agricole (2012)

Analyse des risques (QMRA + simulation Monte Carlo + DALY)

➔ Abattement total de 7 log, décomposé : 4 log par le traitement

2 log décroissance liée à l'activité agricole

1 log lié à la préparation domestique



Approche par « barrières »

➔ Mobilisation des différents maillons de la filière REUSE

➔ Ex : Fr Qualité A : [E.coli] < 250cfu

➔ France, Portugal, UE

Approche « tout traitement »

➔ Abattement total de 7 log par le traitement

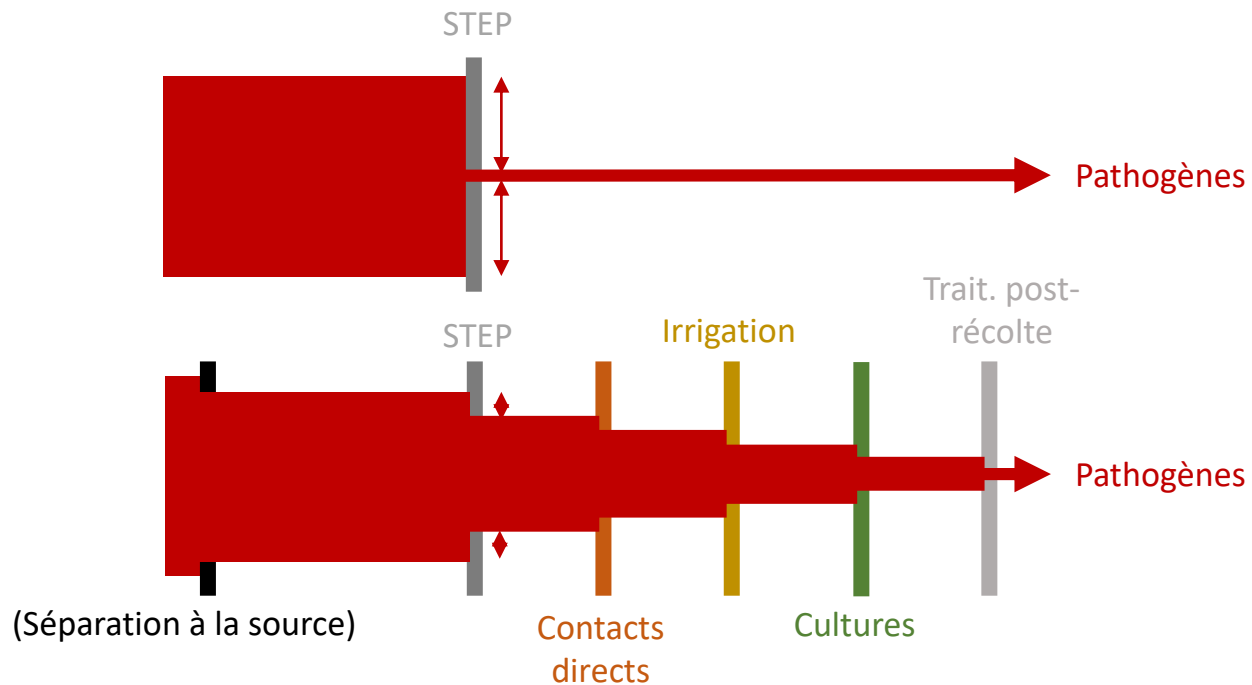
➔ Qualité A : [E.coli] < 10 à 0,1cfu

➔ US, Australie, UE

➤ Approche multi-barrières



Approche par barrières (OMS, 1989, 2006)



INRAE

Evolution gestion des risques sanitaires

19/10/21 – Séminaire Reuse 2021

➤ Effet des barrières (*Norme ISO 16075-2*)

Tableau 2 — Types suggérés et équivalents barrières attribués (adaptation des directives de l'OMS 2006[2] et de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis 2012[3])

Type de barrière	Application	Réduction des agents pathogènes (unités log)	Nombre de barrières
Irrigation des cultures vivrières			
Irrigation par goutte-à-goutte	Irrigation de cultures basses par goutte-à-goutte, par exemple à au moins 25 cm au-dessus du sol	2	1
	Irrigation de cultures hautes par goutte-à-goutte, par exemple à au moins 50 cm au-dessus du sol	4	2
	Irrigation souterraine par goutte-à-goutte, lorsque l'eau ne remonte pas à la surface du sol par capillarité	6	3
Irrigation par aspersion et arrosage	Irrigation de cultures basses par arroseurs et micro-arroseurs, par exemple à au moins 25 cm du jet d'eau	2	1
	Irrigation d'arbres fruitiers par arroseurs et micro-arroseurs, par exemple à au moins 50 cm du jet d'eau	4	2



➤ Effet des barrières (*Norme ISO 16075-2*)

Tableau 2 — Types suggérés et équivalents barrières attribués (adaptation des directives de l'OMS 2006[2] et de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis 2012[3])

Type de barrière	Application	Réduction des agents pathogènes (unités log)	Nombre de barrières
Désinfection additionnelle dans le champ	Légère désinfection	2	1
	Désinfection poussée	4	2
Bâche résistante aux UV	Dans le cadre de l'irrigation par goutte-à-goutte, lorsque la bâche sépare les eaux d'irrigation des légumes	2 à 4	1
Inactivation naturelle des agents pathogènes	Inactivation naturelle favorisée par l'arrêt ou l'interruption de l'irrigation avant la récolte	0,5 à 2 par jour ^a	1 à 2 ^a
Lavage des produits avant leur vente aux consommateurs	Lavage des salades, des légumes et des fruits à l'eau potable	1	1
Désinfection des produits avant leur vente aux consommateurs	Lavage des salades, des légumes et des fruits avec une solution légèrement désinfectante et rinçage à l'eau potable	2	1
Pelage des produits	Pelage des fruits et des légumes à racines	2	1
Cuisson des produits	Immersion dans de l'eau bouillante ou cuisson à haute température jusqu'à ce que le produit soit cuit	6 à 7	3



➤ Effet des barrières (*Norme ISO 16075-2*)

Tableau 2 — Types suggérés et équivalents barrières attribués (adaptation des directives de l'OMS 2006[2] et de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis 2012[3])

Type de barrière	Application	Réduction des agents pathogènes (unités log)	Nombre de barrières
Irrigation des jardins publics			
Contrôle de l'accès	Irrigation de nuit, lorsque le public n'a pas accès aux parcs, terrains de sport et jardins irrigués	0,5 à 1	1
Contrôle de l'irrigation par aspersion	Irrigation par aspersion en respectant des distances supérieures à 70 m par rapport aux zones résidentielles ou lieux accessibles au public	1	1



➤ L'économie circulaire de l'eau en France et en Europe

Synthèse du possible par usage et gisement

		EUT urbaines	EUT industrielles	Eaux d'exhaure	Eau de toiture	Eaux grises domestiques
Environnement	Recharge de rivière	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée	N/A	N/A
	Recharge de nappe (injection)	Pratiquée	Pratiquée	N/A	N/A	Interdite
Agriculture	Irrigation	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée	N/A	N/A
Urbain	Arrosage golfs & espaces verts	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée
	Hydrocurage	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée
Industrie	Process industriel hors IAA, nettoyage	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée	Pratiquée	N/A
Domestique ou assimilé	Ext.	Arrosage de jardin, Lavage de terrasses et espaces verts	Usage non identifié	Usage non identifié	Pratiquée	Pratiquée
		Chasse d'eau	Usage non identifié	Usage non identifié	Pratiquée	Pratiquée
	Int.	Lessive	Usage non identifié	Usage non identifié	Pratiquée	Pratiquée
		Douche, lavabo, consommation, cuisine	Interdite	Interdite	Pratiquée	Interdite

- Pratique **règlementée**.
- Pas de réglementation générale mais la pratique peut-être autorisée au **cas par cas**.
- Pas de réglementation générale mais un avis officiel a été émis ou des **projets démonstrateurs on été réalisés** ou sont en cours.

- Pratique **réglementairement interdite** (code santé publique etc.)
- Usage **non identifié en France** (et non jugé prioritaire), mais potentiellement existant à l'étranger (ex : Australie)

➤ Rappels sur la réglementation REUT

Comparatif réglementations FR / EU

			Qualité FR (arrêté 2 août 2010)				Classe EU (règlement UE 2020/741)			
			A	B	C	D	A	B	C	D
Physico-chimie	MES	mg/L	< 15	Conforme à l'arrêté de rejet de la STEP considérée hors période d'irrigation			≤ 10	Facultatif : < 60 pour STEP < 10 000 EH et < 35 au-delà < 150 pour lagunage)		
	DCO	mg/L	< 60							
	DBO5	mg/L				≤ 10	< 25			
	Turbidité	NUT				≤ 5				
Pathogènes	E coli	UFC/100 mL	≤ 250 ⁽¹⁾	≤ 10 000	≤ 100 000		≤ 10	≤ 100	≤ 1 000	≤ 10 000
	E coli	Abbat. log10					≥ 5			
	Entérocoques fécaux	Abbat. log10	≥ 4	≥ 3	≥ 2					
	Phages ARN F-spécifiques	Abbat. log10				≥ 6				
	Spoires BASR	Abbat. log10				≥ 5				
	Œufs Helminthes	Œuf / Litre				≤ 1 pour irrigation des pâturages et des fourrages				
	Légionelles	UFC/L				< 1 000 si risque de formation d'aérosols				
Usages			Toutes cultures + espaces verts	Toutes cultures hors conso. crues	Céréales, fourrage, pépinières, arbo fruitières	Uniquement forêt avec taillis courte rotation	Toutes cultures y/c conso. crues en contact avec eau	Toutes cultures y/c conso. crues sans contact avec eau	Toutes cultures y/c conso. crues sans contact avec eau	Cultures industrielles, énergétiques et à semences
Méthode d'irrigation			Toutes méthodes		Irrigation localisée ou en goutte-à-goutte		Toutes méthodes		Goutte-à-goutte uniquement	Toutes méthodes

(1) Rappel qualité eau de baignade : <500 Excellent et <1 000 Bon

➤ Multi-barrières

- Quelle est l'efficacité des différentes barrières ?
- Comment organiser le transfert de responsabilités associées au transfert de la gestion du risque sur les différents maillons de la filière reuse ?
- Dans quel mesure la mobilisation de l'approche multi-barrières a un impact plus faible sur l'équilibre économique et le bilan environnemental des projets de reuse ?



➤ Axe 1 : Etat de l'art sur les différentes barrières

- Mobilisation du réseau reuse d'INRAE
 - étude bibliographique sur les mécanismes de transfert des microorganismes pathogènes dans les végétaux et leurs devenir (choix des cultures, traitements post-récoltes)
 - étude bibliographique sur les sur les mécanismes de transfert des microorganismes pathogènes dans les matrices eau, sol et air et sur les modes de prévention à associer (irrigation, protection du personnel agricole et des riverains)
- Modalité de mise en œuvre, efficacité sanitaires des barrières (4 types de pathogènes)
- Proposer d'autres barrières, et des barrières pour d'autres usages non-agricoles ?

Nom Prénom	Département	Unité de Recherche	Équipe	Contribution au projet (disciplines, compétences mobilisées)
MOLLE Pascal	TRANSFORM	REVERSAAL		Génie des procédés
HARMAND Jérôme	AGROECOSYS TEM	LBE	SAMI	Technologie de traitement, modélisation, contrôle des systèmes
AIT MOUHEB Nassim	AQUA	G-EAU	OPTIMIS TE	Génie des procédés, Système d'irrigation
PIVETEAU Pascal	TRANSFORM	OPAAL	SAFIR	Transfert pathogènes des produits résiduels organiques vers les cultures
WERY Nathalie	MICA	LBE	DIEM	Mécanismes de transfert des pathogènes (microbiologiste)
CARLIN Frédéric	TRANSFORM	SQPOV	SporAlim	Traitement post-récolte / Transformation agro-alimentaire
COURAULT Dominique	AGROECOSYS TEM	EMMAH	DISCOVE	Transfert des pathogènes au champ



➤ Axe 2 : Développement d'une démarche d'accompagnement à la mise en place des barrières

- Doctorat, partenariat REVERSAAL / G-Eau
- Définir - redéfinir les filières de reuse avec les acteurs
- Répartir les rôles et responsabilités entre les acteurs
- Démarche co-construite avec les acteurs sur différents territoires d'étude

La modélisation d'accompagnement

- Démarche développée depuis fin 90, par des chercheurs provenant de disciplines différentes travaillant sur des questions de gestion environnementale
- Processus ... visant à expliciter les connaissances qu'ont les acteurs de leur situation (= système complexe) et à améliorer les prises de décision collectives
- Co-construction par les acteurs d'une représentation partagée de la situation (=modèle)
- Modèle utilisé comme support pour explorer des solutions (simulation)
- Application à l'assainissement : planification concertée de l'assainissement (Lombard-Latune, 2019)

ComMod
www.commod.org

MOOC

TerrEau & Co

<https://lms.agreenium.fr>

INRAE

Evolution gestion des risques sanitaires

19/10/21 – Séminaire Reuse 2021

➤ Axe 3 : évaluation de la démarche et de ses impacts

Evaluations à 2 niveaux :

- Démarche en elle-même
 - Ses modalités (format, nb d'ateliers, durée, ...) comme dans ses productions scénarios, changements, structuration des acteurs ...)
 - Méthode de suivi-évaluation ComMod (Hassenforder et al, 2020)
- Comparaison des scénarios multi-barrières / conventionnels
 - Dimension économique (ACB et autres). Partenariat réseau Reuse INRAE (M.Montignoul – G-Eau ?)
 - Dimension environnementale (ACV). Partenariat réseau Reuse INRAE (Pôle ELSA, Montpellier ?)
- Aperçut des conséquence de la mise en conformité avec le règlement européen (Atelier Technique Reuse EPNAC)



> Partenaires



- **INRAE**
 - Réseau REUSE
 - Soutien institutionnel : DAPP, MetaP BETTER
- **Ecofilae** : BE partenaire (terrains, données, encadrement de la thèse, financement)
- **AE RMC** : terrain d'études sur le périmètre de l'Agence, soutien au financement des travaux (thèse, études terrain)
- **EPNAC AT Reuse** : enquête nationale sur les projet de reuse existant, accompagnement et suivi de la mise en conformité avec le règlement européen
- **MTES / DEB** :
 - Éléments pour la définition du cadre national vis-à-vis des barrières
 - Travaux du GT ENC

INRAE

Evolution gestion des risques sanitaires

19/10/21 – Séminaire Reuse 2021



➤ Merci pour votre attention !

remi.lombard-latune@inrae.fr

<https://www6.inrae.fr/reuse>



INRAE

Evolution gestion des risques sanitaires

19/10/21 – Séminaire Reuse 2021