

Convention de partenariat ONEMA-Cemagref 2008

Domaine : Ecotechnologies et pollutions

Action : 28 « Réutilisation des eaux traitées »

Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUT)

Rapport final

Catherine Boutin^(*), Alain Héduit^(**), Jean-Michel Helmer^(**)

Novembre 2009

(*) UR « Qualité des eaux et prévention des pollutions » - Cemagref Lyon

(**) UR « Hydro-systèmes et bio procédés » - Cemagref Antony

ONEMA – Direction de l'Action Scientifique et Technique

Correspondant : S. Garnaud (stephane.garnaud@onema.fr)

Référence : 2008_Onema-Cemagref_Technologies d'épuration en vue d'une REUT.pdf

Note importante

Dans le cadre d'une convention signée entre l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) et le Cemagref concernant la réutilisation des eaux usées traitées, il est demandé au groupement de Lyon d'identifier les technologies d'épuration pertinentes qui permettraient, si besoin est, de développer cette pratique en France. En parallèle de cette étude, un travail relatif à la législation est assuré par le Cemagref d'Antony. L'ensemble de ce projet se veut donc de nature prospective.

Pour mener à bien ce travail, il convient de s'appuyer sur l'expérience des modèles internationaux (Tunisie, Israël, Californie, ...) et de vérifier si la transposition peut effectivement avoir lieu sur le territoire français. De plus, les visites de sites français (seront ici présentés le cas de Clermont-Ferrand et quelques sites du Maine et Loire) de réutilisation des eaux peuvent fournir des indications intéressantes sur les potentialités d'évolution des technologies d'épuration et leur adaptation, ou pas, à ces types de projets.

Le présent rapport regroupe les aspects techniques et réglementaires. Il s'appuie beaucoup sur une synthèse bibliographique réalisée par Jordan SEIRA, stagiaire au Cemagref de Lyon, pendant l'été 2008, dont la qualité du travail fourni a été fort appréciée. Ce rapport réalisé par un étudiant est enrichi, à la suite d'une relecture attentive, des remarques formulées par Anne-Marie POURCHER (Cemagref Rennes) et Antonina ARMENGOL TORRENS (Institut de Recerca de l'Aigua de la Universitat de Barcelona).

Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUT)

C. Boutin, A. Héduit et J.M. Helmer

Convention de partenariat ONEMA-Cemagref 2008

Résumé

La raréfaction de l'eau conduit bien souvent les pays à se tourner vers des modes d'approvisionnement alternatifs. La *réutilisation des eaux usées traitées* en fait partie.

En France, l'état de pénurie est loin d'être déclaré. De plus, une absence de réglementation n'encourage pas le recours à cette utilisation et justifie ainsi l'existence de seulement quelques cas sporadiques. Dans ce contexte, il a été demandé au Cemagref d'évaluer, à partir de connaissances issues de bibliographie nationales et internationales les technologies en regard des différents objectifs sanitaires.

La 1^{ère} étape de ce rapport consiste à cibler les *paramètres d'intérêt* en réutilisation des eaux. Les recherches ont permis de mettre en lumière que la bactériologie, les micropolluants organiques et minéraux ainsi que les sels dissous, étaient les principaux paramètres à considérer, vu les *risques* qu'ils présentaient pour l'Homme et l'Environnement.

Après un rapide tour d'horizons des *recommandations* internationales et françaises existantes, l'étude se poursuit par l'identification des *technologies de traitement* permettant la minimisation voire l'élimination du risque présenté par chacun des paramètres suscités. Parmi les techniques identifiées, les procédés de désinfection et de filtration sont les plus à même de répondre aux exigences de qualité préconisées par les *recommandations sanitaires* françaises.

Le travail s'est clôturé par la mise en relation des différents usages et de la qualité requise, avec les filières de traitement possibles. Cette dernière partie est principalement orientée vers les usages agricoles et urbains qui sont les emplois les plus susceptibles de se développer en France.

Mots clés : *réutilisation des eaux usées traitées, risque, technologies de traitement, recommandations sanitaires*

Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUT)

C. Boutin, A. Héduit et J.M. Helmer

Convention de partenariat ONEMA-Cemagref 2008

Table des matières

<i>Note importante</i>	3
<i>Introduction sur la réutilisation des eaux usées traitées</i>	9
<i>Contexte de la réutilisation des eaux</i>	10
<i>I. Paramètres d'intérêt en REUT</i>	16
1. Microorganismes contenus dans les eaux usées	16
2. Eléments traces	22
3. Salinité	26
4. Autres paramètres	30
5. Contrainte de qualité des eaux : la notion de risque	31
<i>II. Recommandations / Réglementations</i>	34
1. Réglementations européennes ayant des liens indirects avec la REUT	34
2. Recommandations / guides nationaux	35
3. Et en France	38
<i>III. Traitement des eaux usées</i>	42
1. Composition d'une eau résiduaire urbaine	42
2. Technologies de traitement des eaux usées en REUT	43
<i>IV. Quelle(s) filière(s) de traitement pour quel usage ?</i>	55
1. « Cercle de l'épuration » en REUT	55
2. « Modèle européen » proposé par AQUAREC	56
3. Niveaux de qualité recommandés par le CSHPF et leurs différentes applications	56
4. Différentes filières de traitement en regard des objectifs sanitaires	59
<i>Conclusion</i>	63
<i>Bibliographie</i>	64
<i>ANNEXES</i>	68

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Principaux virus présents dans les eaux usées	17
Tableau I-2 : Principales bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées	18
Tableau I-3 : Principaux protozoaires présents dans les eaux usées.....	19
Tableau I-4 : Principaux helminthes présents dans les eaux usées.....	19
Tableau I-5 : Caractéristiques épidémiologiques de quelques agents pathogènes.....	20
Tableau I-6 : DMI moyennes des agents pathogènes présents dans les eaux usées.....	21
Tableau I-7 : Composition microbiologique d'une eau résiduaire urbaine « classique »	21
Tableau I-8 : Gammes de concentration totale (en µg/L) de quelques éléments chimiques présents dans les eaux usées urbaines.....	23
Tableau I-9 : Classification d'éléments chimiques minéraux en fonction de leur intérêt et de leur toxicité potentielle.....	24
Tableau I-10 : Concentrations maximales en bore (B) dans l'eau d'arrosage basées sur l'apparition de symptômes de toxicité lors de cultures sur sable.....	24
Tableau I-11 : Concentrations médianes (en ng/L) de quelques molécules organiques retrouvées dans les eaux usées et dans les eaux de surface.....	25
Tableau I-12 : Classes de qualité de salure de l'eau d'irrigation (d'après Faby, 1997).....	27
Tableau I-13 : Rendements de quelques cultures en fonction de la salinité de l'eau d'arrosage (exprimée en µS/cm).....	27
Tableau I-14 : Concentrations en Na et Cl de l'eau d'aspersion provoquant des brûlures des feuilles.....	28
Tableau I-15 : Influence de la salinité et du RAS sur le taux d'infiltration	29
Tableau II-1 : Impact implicite des directives européennes sur la REUT	34
Tableau II-2 : Exigences fixées par les Etats pour un usage sans restriction (US-EPA, 2004)..	35
Tableau II-3 : Exigence de l'US-EPA pour l'irrigation de cultures.....	36
Tableau II-4 : 3 niveaux de qualité (OMS, 1989)	37
Tableau II-5 : Classes et indices de qualité de l'eau vis à vis de l'altération « Bactéries et micro-organismes » (Ministère De L'écologie Et Du Développement Durable, Agences de l'eau, 2003)	39
Tableau II-6 : Classes d'aptitude aux usages : irrigation, et les loisirs et sports nautiques vis à vis de l'altération « micro-organismes » (Ministère De L'écologie Et Du Développement Durable, Agences de l'eau, 2003).....	39
Tableau II-7 : Recommandations françaises (d'après la circulaire DGS/SD1.1D/92/42)	40
Tableau II-8 : Valeurs limites de la qualité des eaux réutilisées (Lazarova et Brissaud (2007))	40
Tableau III-1 : Composition d'une eau résiduaire urbaine « classique »	42
Tableau III-2 : Techniques les plus répandues en traitement secondaire	44
Tableau III-3 : Efficacité « attendue » du traitement secondaire	45
Tableau III-5 : Autres techniques en traitement secondaire	46
Tableau III-6 : Techniques de filtration en traitement tertiaire	47
Tableau III-7 : Avantages et inconvénients du lagunage tertiaire.....	49
Tableau III-8 : Autres techniques en traitement tertiaire (Asano et al., 2007).....	49
Tableau III-9 : Efficacité « attendue » du traitement tertiaire (en % ou u.log)	50
Tableau III-10 : Techniques de désinfection les plus répandues.....	51
Tableau III-11 : Quelques caractéristiques des procédés de désinfection	52
Tableau III-12 : C _{RT} typiques pour plusieurs niveaux d'inactivation de microorganismes	53
Tableau III-13 : Autres « techniques » possibles en désinfection.....	54
Tableau IV-1 : Recommandations du CSHPF de 1991.....	57
Tableau IV-2 : Recommandations du CSHPF appliquées au maraîchage.....	57
Tableau IV-3 : Recommandations du CSHPF appliquées aux vergers.....	57
Tableau IV-4 : Recommandations du CSHPF appliquées aux cultures céréalières	58
Tableau IV-5 : Recommandations du CSHPF appliquées aux forêts.....	58
Tableau IV-6 : Recommandations du CSHPF appliquées aux prairies	58
Tableau IV-7 : Recommandations du CSHPF appliquées aux espaces verts.....	59
Tableau IV-8 : Performance des filières de traitement des eaux usées permettant une eau de qualité A.....	62

Tableau E-1 : Concentrations maximales en éléments traces minéraux recommandées dans les eaux d'irrigation.....	84
Tableau H-1 : Techniques les plus répandues en traitement primaire	91
Tableau H-2 : Efficacité « attendue » du traitement primaire (%).....	92
Tableau I-1 : Différentes technologies en REUT proposées par AQUAREC.....	93
Tableau I-2 : Combinaisons possibles à partir d'un effluent brut.....	94
Tableau I-3 : Combinaisons possibles à partir d'un effluent primaire	94
Tableau I-4 : Combinaisons possibles à partir d'un effluent secondaire.....	95

Liste des figures

Figure 1 : Représentation du stress hydrique dans le monde	10
Figure 2 : Volume moyen journalier des eaux usées recyclées en m ³ /j (quelques pays)	11
Figure 3 : Prélèvements d'eau par secteur, en France : 33 km ³ (haut) et consommation réelle : 12 km ³ (bas).....	12
Figure 4 : Répartition par usage et localisation des expériences mondiales les plus importantes en REUT	14
Figure I-1 : Entérovirus vus au microscope électronique (pas d'échelle)	16
Figure I-2 : Escherichia coli vues au microscope électronique.....	17
Figure I-3 : Cryptosporidium parvum vu au microscope électronique.....	18
Figure I-4 : Helminthe vu au microscope électronique (pas d'échelle)	19
Figure III-1 : Constituants retenus suivant chaque technique membranaire.....	48
Figure IV-1 : « Cercle de l'épuration » en réutilisation des eaux	55
Figure IV-2 : Usages suggérés suivant le niveau de traitement	60
Figure B-1 : Schématisation de l'organisation du projet de REUT de Clermont-Ferrand.....	75
Figure H-1 : Agencement des prétraitements en station de traitement des eaux usées.....	90

Liste des annexes

ANNEXE A : Recensement des sites français de REUT à l'été 2008
ANNEXE B : Site de réutilisation des eaux usées de Clermont-Ferrand
ANNEXE C : Quelques sites de réutilisation des eaux usées traitées dans le Maine et Loire
ANNEXE D : Bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées traitées
ANNEXE E : Caractéristiques de quelques micropolluants métalliques
ANNEXE F : Caractéristiques de quelques micropolluants organiques
ANNEXE G : Concentrations médianes (maximales) de produits pharmaceutiques et de produits de soins corporels (PPCP) issus de la surveillance des eaux de rivière, des eaux usées avant et après traitement (en ng/L)
ANNEXE H : Intérêt des prétraitements et du traitement primaire
ANNEXE I : Modèle proposé par AQUAREC
ANNEXE J : Réglementations européennes et françaises ayant un lien indirect avec la REUT

Introduction sur la réutilisation des eaux usées traitées

On dit souvent que la prochaine crise pour l'Humanité sera celle de l'eau potable et que, par conséquent, sa préservation est une priorité. Pourtant, n'est-il pas fréquent de constater son emploi pour des usages ne le justifiant pas tels que le nettoyage des trottoirs, celui des voitures ou encore l'arrosage de parcs par exemple ? Afin de limiter cette utilisation déraisonnée de l'eau potable, il convient de chercher des approvisionnements alternatifs. La Réutilisation des Eaux Usées Epurées (REUT) pourrait alors en être un.

En France, l'importante disponibilité en eau n'implique pas le recours systématique à cette pratique. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'il existe, d'une part, de fortes variations imputables aux différences interannuelles de la pluviométrie et d'autre part, de fortes disparités géographiques sur le territoire. A titre d'exemple, en 2006, les précipitations observées en Bretagne étaient de l'ordre de 1 000 mm alors que dans la région marseillaise, elles n'étaient que de 300 mm (*Hauteurs totales des précipitations, site Internet de Météo France, 2006*). Ajoutons à cela des problèmes grandissants en matière de qualité des ressources hydriques et cette pratique pourrait bien connaître un prompt développement.

La REUT recouvre deux notions : le traitement puis la réutilisation proprement dite d'eaux usées traitées. Les eaux usées sont celles rejetées par les collectivités, les industries et les particuliers, puis collectées et acheminées par les réseaux d'égouts vers les stations de traitement des eaux usées afin d'y être traitées. Ce n'est qu'à la fin de ces traitements qu'on les appelle eaux usées traitées. La REUT propose de récupérer ces eaux usées traitées, de leur apporter éventuellement un traitement complémentaire et de s'en servir pour différents usages.

Les eaux usées sont chargées en polluants et autres contaminants, ce qui pose le problème des risques sanitaires liés à une REUT et des traitements nécessaires. Le premier travail de cette synthèse est donc d'analyser les paramètres devant faire l'objet d'un suivi marqué dans tout projet de REUT, ceci étant réalisé après un bref avant-propos sur le sujet. Cette étude se poursuit par une veille réglementaire, suivie d'un état de l'art des différentes technologies à mettre en place pour atteindre le degré de qualité préconisé par les différentes recommandations. Un lien est ensuite établi entre l'usage de l'eau traitée et les techniques de traitement associées. Le travail comprend également un recensement des sites existants sur le territoire français, accompagné d'un développement pertinent pour le cas de Clermont-Ferrand et diverses installations du Maine et Loire.

De nombreuses remarques de bas de pages jalonnent ce document, ceci afin de permettre une meilleure compréhension du contenu. On remarque également, tout au long de cette synthèse, que l'étude est orientée principalement vers les utilisations agricole et urbaine des eaux usées traitées puisque ce premier usage est actuellement le plus répandu en France et que le second est celui qui a le plus de chance de se développer dans l'Hexagone (*Lazarova et Brissaud, 2007*).

Contexte de la réutilisation des eaux

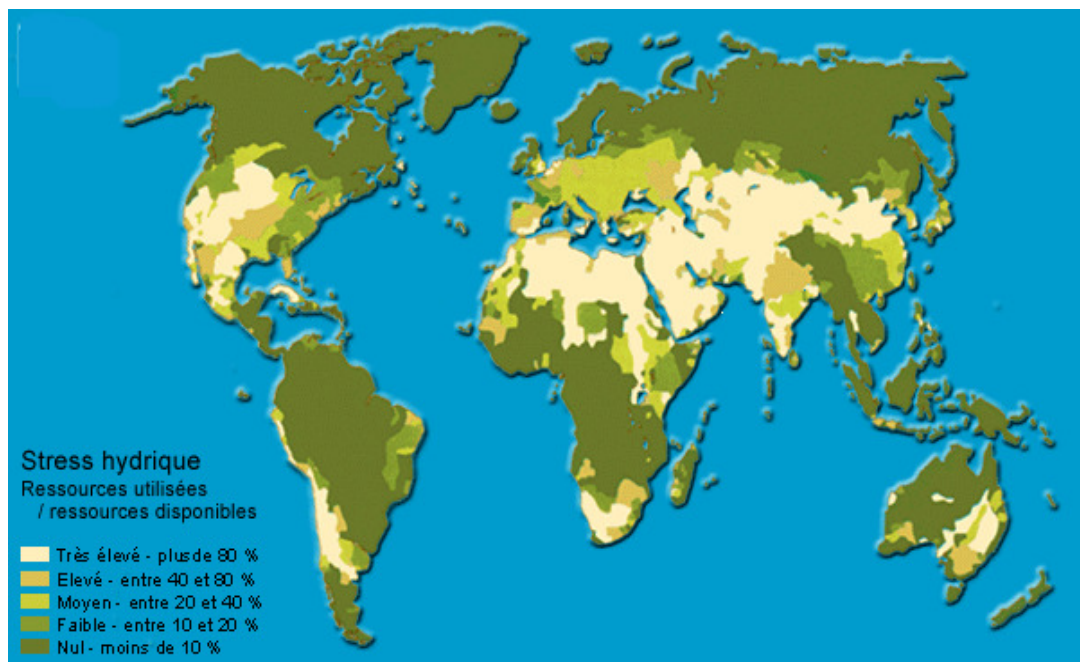
La réutilisation des eaux usées traitées se présente comme un enjeu politique et socio-économique pour le développement futur des services d'eau potable et d'assainissement. Elle présente l'avantage d'assurer une ressource alternative, de mieux préserver les ressources naturelles et de contribuer à la gestion intégrée de l'eau. A travers cette partie, un bref aperçu du contexte actuel de la REUT dans le monde et en France permettra de mieux comprendre les tenants et aboutissants de ces projets et, éventuellement, de discerner les perspectives d'évolution.



Eau dans le monde

La question de l'eau et de ses réserves est un problème qui anime les populations du monde entier depuis des décennies. Les poussées démographiques, l'agriculture extensive, le réchauffement climatique sont quelques uns des nombreux exemples mettant en péril la pérennité des ressources.

La carte ci-dessous (*figure 1*) présente l'état actuel du stress hydrique dans le monde. On parle de stress hydrique lorsque la demande en eau dépasse les ressources disponibles ou encore, lorsque la disponibilité en eau par an et par habitant est inférieure à 1 700 m³.

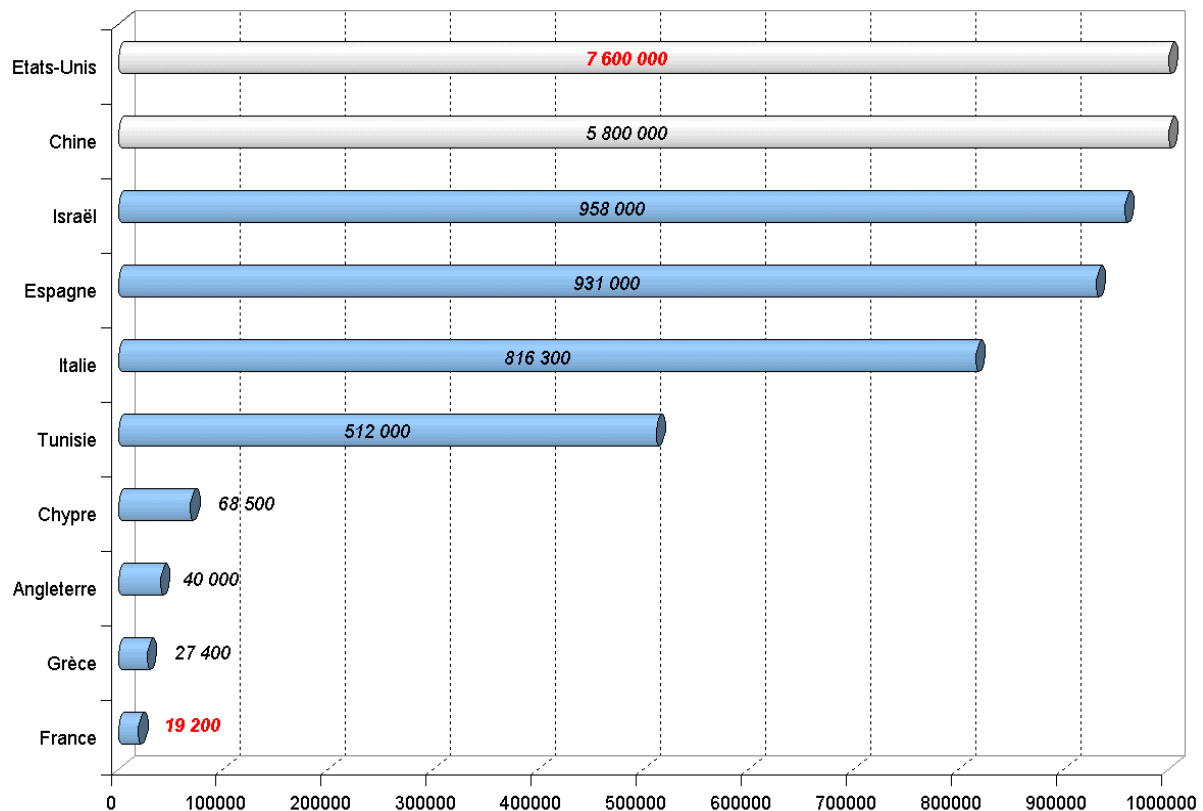


source : www.solidarites.org

Figure 1 : Représentation du stress hydrique dans le monde

Une « ceinture » allant de l'Amérique du Nord jusqu'à l'Est de l'Asie semble regrouper la majeure partie des pays en situation de stress hydrique le plus important. A l'inverse, les pays situés aussi bien au Nord qu'au Sud de cette « ceinture » ne semblent pas souffrir d'un stress hydrique marqué, à quelques exceptions près. Toutefois, il ne faut pas exclure l'existence d'importantes variations au sein d'un même pays, ce qui est notamment le cas des États-Unis ou même de la France. En effet, la *figure 1* semble indiquer une importante stratification du stress hydrique en France et une demande plus importante au Nord qu'au Sud. Les auteurs qui ont élaboré cette carte ne donnent pas d'éléments pouvant justifier cette remarque mais un lien probable avec une forte demande agricole et/ou la géologie des sols pourrait l'expliquer.

En 2000, la moyenne annuelle mondiale des ressources en eau renouvelables par habitant était estimée à 6 600 m³ mais qu'à l'horizon 2025, ce nombre devrait dramatiquement chuter à 4 800 m³ (*WorldWaterCouncil, 2000*). Pour pallier ces fortes disparités, de nombreux pays ont orienté leurs recherches vers des programmes de réutilisation des eaux et on note une multiplication importante des projets. Ces dix dernières années, le volume des eaux usées réutilisées a augmenté de 10 à 29 % par an, en Europe, aux Etats-Unis et en Chine, et jusqu'à 41 % en Australie (*Lazarova et Brissaud, 2007*). Ces résultats ne doivent pas faire oublier que seulement 5 % des eaux usées traitées sont réutilisées, soit un volume de 7,1 km³ par an, à comparer avec les 10 000 à 14 000 km³ par an d'eau douce renouvelable et facilement accessible (*site Internet de l'UNESCO, 2003*).



source : adapté de Lazarova et Brissaud (2007)

Figure 2 : Volume moyen journalier des eaux usées recyclées en m³/j (quelques pays)

Le graphique ci-dessus (*figure 2*) donne une idée des volumes journaliers d'eaux usées traitées recyclées par certains pays. Alors qu'on note que des pays comme les Etats-Unis, Israël, l'Espagne (pour ne citer qu'eux) ont une pratique soutenue de la réutilisation des eaux et par la même occasion, une expérience notable, d'autres pays sont nettement plus en retard sur ce point, ce qui est visiblement le cas de la France.

Certains pays et états (Australie, Jordanie, Californie, Floride, ...) ont pour objectif de satisfaire 10 à 30 % de leur demande en eau par cette ressource alternative dans les 5 à 10 prochaines années. D'un autre côté, Chypre et l'Espagne se sont lancés les objectifs les plus ambitieux avec une réutilisation de 100 % des eaux usées pour le premier et, à Madrid, satisfaire 10 % de la demande en eau par ce mode d'approvisionnement (*Lazarova et Brissaud, 2007*).

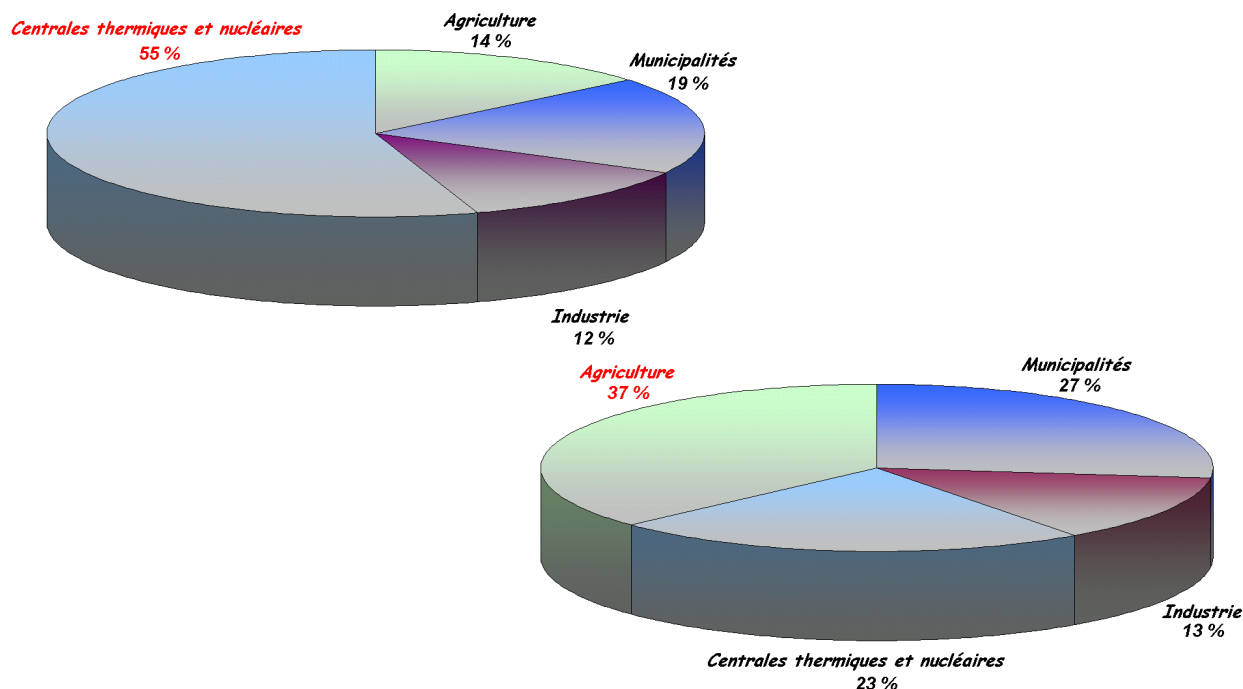
Bien que cette pratique apparaisse comme providentielle pour certains pays, la situation française se limite à quelques cas. Le paragraphe suivant mettra en lumière l'état des lieux de la réutilisation des eaux sur le territoire.



Usages de l'eau en France

Dans les années 1980, la France faisait partie des pays européens les plus dynamiques en développant la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation agricole. Bien que disposant d'un large éventail de technologies dans le domaine du traitement des eaux, le modèle français a, par la suite, accumulé beaucoup de retard par rapport à l'expérience mondiale des réutilisations et semble aujourd'hui au point mort. La ressource en eau de la France est globalement supérieure à la demande et le pays est plutôt loin de l'état de pénurie. Cette observation pourrait, à elle seule, justifier le faible développement de la réutilisation des eaux mais rappelons qu'il existe une forte dispersion des ressources sur le territoire et donc, une potentielle source de motivation pour l'élaboration de projets de réutilisation.

La répartition des utilisations d'eau permettrait également d'expliquer le faible engouement français pour ce mode d'approvisionnement (*figure 3*). Au niveau mondial, 70 % de l'eau prélevée est destinée à l'agriculture et 93 % de l'eau réellement consommée résulte de cet usage (données adaptées de *WorldWaterCouncil*, 2000). La production agricole et la préservation des ressources sont souvent des enjeux économiques notables pour une majorité de pays et le développement fulgurant des projets de REUT paraît les justifier. En France, parmi les 33 km³ d'eau prélevée chaque année, ce sont les centrales thermiques et nucléaires qui sont à l'origine de plus de la moitié des volumes d'eau prélevés (55 %), soit 4 fois plus que l'usage agricole (14 %). Les divergences entre le modèle mondial et le modèle français pourraient expliquer pourquoi l'intérêt pour la réutilisation des eaux usées n'est pas le même.



source : extrait et adapté de Blum (2005)

Figure 3 : Prélèvements d'eau par secteur, en France : 33 km³ (haut) et consommation réelle : 12 km³ (bas)

Toutefois, il faut nuancer ce propos puisque l'eau prélevée n'est pas nécessairement consommée. En effet, l'eau utilisée pour le refroidissement des centrales thermiques et nucléaires est souvent rejetée directement dans le milieu naturel. Ainsi, « uniquement » 12 km³ d'eau est réellement consommé par tous ces usages chaque année. De ce point de vue, l'usage agricole est nettement plus gourmand et consomme plus du tiers (37 %) du volume total d'eau réellement utilisé. C'est donc dans une perspective de réduction des prélèvements d'eau à destination agricole que pourrait se développer la réutilisation des eaux en France.

La question de la réutilisation des eaux dans les DOM - COM n'a pas été évoquée dans la bibliographie consultée. Il est vrai qu'avant de parler de réutilisation des eaux usées traitées, il faut déjà parler du problème de l'assainissement dans les îles. Ce problème étant mis à part, il faut préciser que les îles sont très dépendantes des activités agricoles et du tourisme et vivent, pour certaines, sous la menace de pénuries d'eau. La réutilisation des eaux à destinée agricole et/ou potable pourrait très bien se développer dans les îles présentant cette configuration.



Possibilités de réutilisation des eaux usées traitées

Les lignes suivantes exposent rapidement toutes les pratiques possibles avec les eaux usées traitées puis la nature des réutilisations que l'on rencontre actuellement en France. Ceci permettra également de cerner les usages qui pourraient être développés sur le territoire. Une carte des principales voies de réutilisation des eaux dans le monde finalisera cette partie.

En fonction des exigences de qualité des utilisateurs, deux grandes classes de réutilisation peuvent être définies :

- les *usages non potables*, concernant principalement les secteurs agricole, industriel et urbain ;
- les *usages potables* qui peuvent, après un traitement poussé être « directs », ou « indirects » à la suite d'un passage dans le milieu naturel.

Chacune de ces classes regroupe diverses catégories (extraites et adaptées d'*Asano et al., 2007*). L'ordre d'apparition des usages s'effectue de la pratique la plus répandue vers l'utilisation la moins pratiquée.

Les **usages non potables** sont principalement :

- l'*irrigation agricole* : cultures céréalières, arbres fruitiers, forêts, protection contre le gel, ... ;
- les *utilisations industrielles* : eaux de refroidissement, eaux de procédés (*process*), générateurs de vapeurs, nettoyage des équipements, protection contre les incendies, ... ;
- les *utilisations urbaines* : entretien de voirie, lavage des WC (chasse) et des voitures, nettoyage des édifices publics ornementaux, irrigation des parcs, cimetières, jardins publics, ... ;
- les *usages récréatifs* : lacs et bassins artificiels, soutien au débit d'étiage des cours d'eau, entretien des habitats naturels et des zones humides, production de neige, pêcheries, ... ;
- la *recharge de nappe* : lutte contre l'intrusion d'eau de mer ou d'eau saumâtre dans le cas d'une surexploitation de l'aquifère, réapprovisionnement des nappes en situation critique, stockage de l'eau traitée en prévision de futures utilisations, ...

Les **usages potables** sont quant à eux majoritairement :

- la *production indirecte d'eau potable* : augmentation de la disponibilité en eau, mode de production souvent lié à la recharge de nappe ;
- la *production directe d'eau potable* : l'usine de Windhoek (Namibie) est l'exemple le plus connu de production d'eau potable à partir d'eaux usées traitées mais cette pratique est peu répandue.



Applications les plus répandues en France

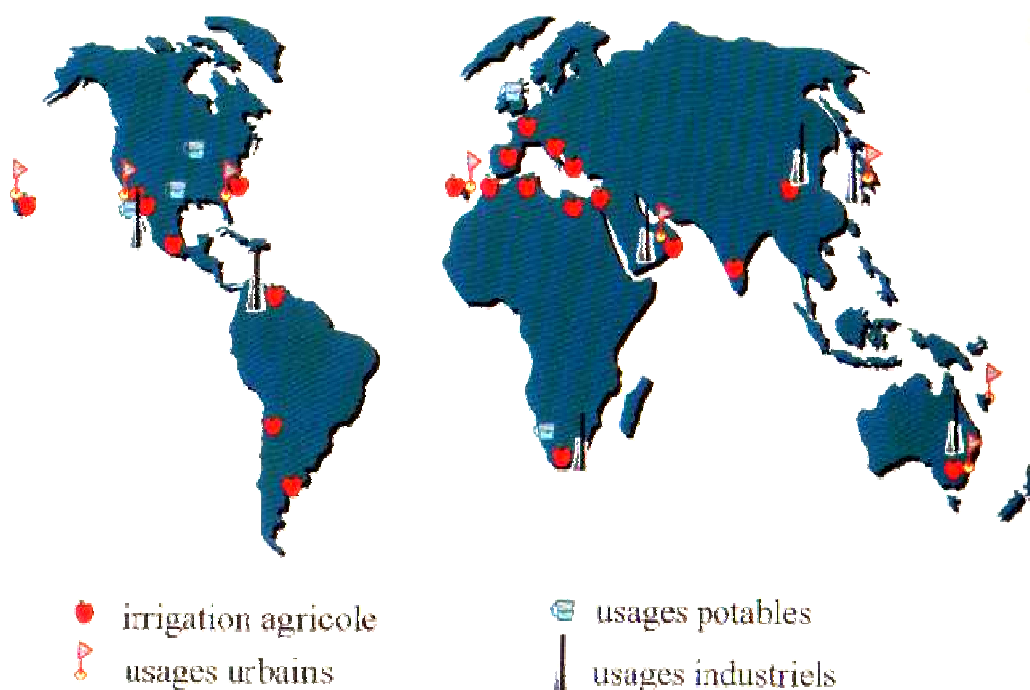
En France, on ne compte que quelques dizaines de cas sur le territoire. Le recensement des sites à l'été 2008 figure en *ANNEXE A*. La pratique la plus répandue est incontestablement l'utilisation agricole, caractéristique de plus de la moitié des sites recensés. Deux exemples français d'usage agricole sont décrits plus précisément en *ANNEXE B*, pour le site de Clermont-Ferrand et en *ANNEXE C* pour 2 installations du Maine et Loire. Il s'agit essentiellement d'irrigation de cultures céréalières (maïs) et fourragères.

L'irrigation de prairies, vergers, maraîchages ou forêts est pratiquée à moindre échelle. Il existe également quelques cas isolés d'irrigation d'espaces verts dont la majorité est représentée par les terrains de golf. Les autres applications possibles n'ont apparemment pas encore été expérimentées et pourraient donc faire l'objet de nouveaux projets.



Petit tour du monde sur la REUT

La *figure 4* résume les principales voies de réutilisation dans les pays ayant une expérience significative dans ce domaine.



source : Ecosse (2001)

Figure 4 : Répartition par usage et localisation des expériences mondiales les plus importantes en REUT

Il apparaît que la réutilisation pour l'irrigation est essentiellement présente dans les pays réputés agricoles mais dont les ressources hydriques sont faibles, comme le bassin méditerranéen ou encore le Sud des Etats-Unis. Les plus grands projets de réutilisation ont été développés dans les régions de l'Ouest et de l'Est des Etats-Unis, l'espace méditerranéen, l'Australie, l'Afrique du Sud et dans les zones semi-arides de l'Amérique du Sud et de l'Asie du Sud.



Bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux

Afin d'estimer la pertinence d'un projet, un bilan des intérêts et défis engagés s'impose. Parmi les avantages reconnus à la réutilisation des eaux usées traitées, on distingue six volets « principaux » (d'après *Lazarova et Brissaud, 2007*) :

- la ressource alternative (flexibilité de l'approvisionnement, ...) ;
- la conservation et la préservation des ressources (économiser l'eau potable, ...) ;
- les aspects législatifs et sanitaires (contribuer au déploiement de la DCE¹) ;
- la valeur économique ajoutée (réduire les coûts de pompage, ...) ;
- la valeur environnementale (réduire l'utilisation d'engrais, ...) ;
- et, l'intégration dans le développement durable².

D'un autre côté, les défis devant être surmontés dans les projets de réutilisation peuvent être classés en cinq thèmes :

- les aspects législatifs et sanitaires (problèmes de santé publique, ...) ;
- les enjeux sociaux-légaux (acceptation publique de la réutilisation, ...) ;
- les aspects économiques (financement des infrastructures, ...) ;
- les enjeux environnementaux et agronomiques (présence excessive de sels, ...) ;
- et, les défis technologiques (importance du choix des opérations de traitement, ...).

Pour plus de détails concernant chacune de ces idées directrices, se référer à l'*ANNEXE D*. Elle recense, d'une manière plus exhaustive, les avantages et inconvénients intégrés à la mise en place de projets de telle envergure.

¹ La Directive Cadre Européenne sur l'Eau a pour objectif d'atteindre, d'ici à 2015, les « bons états » écologique et chimique pour tous les milieux aquatiques naturels et de préserver ceux qui sont en très bon état.

² Le « développement durable » (ou développement soutenable) est, selon la définition proposée en 1987 par la *Commission mondiale sur l'environnement et le développement* dans le rapport Brundtland, « un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [...] ».

I. Paramètres d'intérêt en REUT

On s'intéressera plus particulièrement aux substances entraînées ou dissoutes dans l'eau : les microorganismes et les éléments traces. Une partie concernant la salinité sera également abordée, même si ce paramètre ne présente actuellement pas de problèmes notables en REUT en France.

1. Microorganismes contenus dans les eaux usées

Les microorganismes, retrouvés dans les eaux usées se repartissent en 4 groupes : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes. Ils proviennent de l'environnement et des matières fécales ; la flore entérique (*i.e.* intestinale) peut contenir des microorganismes pathogènes. On ne parlera ici que de ces derniers. Ils ont des effets divers sur la santé : ils sont la cause d'infections bénignes (gastro-entérite par exemple) comme de maladies mortelles (choléra, maladie citée pour mémoire puisque cette maladie n'est plus répertoriée en France). Le pouvoir pathogène des microorganismes (ou pathogénicité) dépend de plusieurs facteurs qui seront brièvement décrits.



source : www.worsleyschool.net

Figure I-1 : Entérovirus vus au microscope électronique (pas d'échelle)

Les virus (figure I-1) sont des parasites intracellulaires de très petite taille (10 à 350 nm) qui ne peuvent se multiplier que dans une cellule *hôte*. Leur concentration dans les eaux usées urbaines est comprise entre 10^3 et 10^4 particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées sont difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel.

Les virus ne sont pas naturellement présents dans l'intestin, contrairement aux bactéries. Ils sont présents soit intentionnellement (après une vaccination intramusculaire contre la poliomyélite par exemple), soit chez un individu infecté accidentellement. Le mode d'infection est, dans la majorité des cas, l'ingestion mais il peut également exister des cas d'inhalation (Coronavirus par exemple).

Il semble que les virus soient plus résistants dans l'environnement que les bactéries et que leurs faibles dimensions soient à l'origine de leurs possibilités de dissémination (*Faby, 1997*). Le *tableau I-1* regroupe les principaux virus pathogènes potentiellement présents dans les eaux usées.

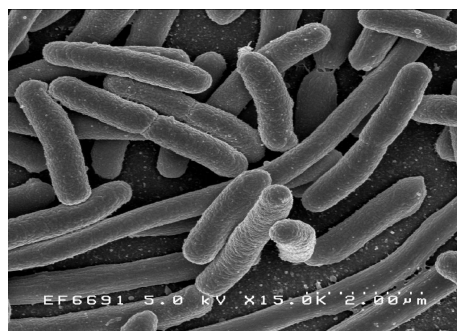
Tableau I-1 : Principaux virus présents dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Mode(s) de contamination
Virus de l'hépatite A	Hépatite A	Ingestion
Virus de l'hépatite E	Hépatite E	Ingestion
Parvovirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Reovirus	Affection respiratoire bénigne et diarrhée	Ingestion
Rotavirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Calicivirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Coronavirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion/Inhalation
Astrovirus	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Virus de Norwalk	Vomissement, diarrhée	Ingestion
Coxsackie	Méningite, maladie respiratoire, ...	Ingestion
Echovirus	Méningite, diarrhée, ...	Ingestion
Adenovirus	Maladie respiratoire, conjonctivite, diarrhée, ...	Ingestion

source : adapté de l'US-EPA (1992) ; Asano (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans Baumont (2004)



Bactéries



source : www.niaid.nih.gov

Figure I-2 : *Escherichia coli* vues au microscope électronique

Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples (à l'image d'*E. coli* sur la figure I-2) et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 µm. Les eaux usées urbaines contiennent environ 10^7 à 10^8 bactéries³/L dont 10^6 entérocoques et entérobactéries, 10^4 à 10^5 streptocoques fécaux et 10^3 à 10^4 *Clostridium*. La majorité de ces organismes ne présentent pas un danger pour la santé et la concentration en bactéries pathogènes peut atteindre de l'ordre de 10^4 /L.

Toutefois, chez un hôte infecté, le nombre de bactéries pathogènes peut être très important. Les bactéries entériques sont adaptées aux conditions de vie dans l'intestin, c'est-à-dire une grande quantité de matière carbonée et de nutriments, et une température relativement élevée (37°C.). Leur temps de survie dans le milieu extérieur, où les conditions sont totalement différentes, est donc limité. Par ailleurs, les bactéries pathogènes vont se trouver en compétition avec les bactéries indigènes d'origine environnementale, ce qui limitera leur développement.

³ Cultivables c'est à dire les bactéries aptes à se développer sur le milieu de cultures retenu.

La voie de contamination majoritaire est l'ingestion. Les bactéries pathogènes d'origine hydrique (quelques noms sont cités dans le *tableau I-2*) sont responsables de la mort de 3 à 10 millions de personnes par an dans le monde et les pays industrialisés ne sont pas épargnés.

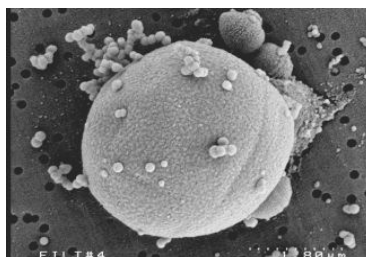
Tableau I-2 : Principales bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Mode(s) de contamination
<i>Salmonella</i> (différents sérotypes ⁴)	Salmonellose	Ingestion
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastro-entérite	Ingestion
<i>Leptospira spp.</i>	Leptospirose	Cutanée/Ingestion/Inhalation
<i>Legionella</i>	Légionellose	Inhalation
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastro-entérite	Ingestion
<i>Listeria monocytogènes</i>	Listériose	Ingestion
<i>Escherichia coli</i> (certains sérotypes dont O157:H7) ⁵	Syndrome Hémolytique et Urémique ⁶ (SHU)	Ingestion
<i>Shigella</i> ⁷	Dysenterie bacillaire	Ingestion
<i>Salmonella Typhi</i> ⁷	Fièvre typhoïde	Ingestion
<i>Vibrio cholerae</i> ⁷	Choléra	Ingestion
<i>Mycobacterium</i> ⁷	Tuberculose	Inhalation

source : adapté de l'US-EPA (1992) ; Asano (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans Baumont (2004)



Protozoaires



source : www.esemag.com

Figure I-3 : *Cryptosporidium parvum* vu au microscope électronique

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries (taille comprise entre 1 et 200 μm). La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites, c'est-à-dire, qu'ils se développent aux dépens de leur hôte. Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées. Parmi les protozoaires les plus « connus » (*tableau I-3*), on peut citer *Entamoeba histolytica*, responsable de la dysenterie amibienne ou encore *Cryptosporidium parvum* (*figure I-3*).

⁴ D'après le site internet www.vulgaris-medical.com, le sérotype est l'ensemble des caractéristiques antigéniques de certains microbes qui permettent de faire la différence entre les souches qui appartiennent à une espèce.

⁵ La lettre O correspond à l'antigène somatique contenu dans les lipopolysaccharides présents sur la paroi bactérienne des souches à Gram négatif. La lettre H correspond à l'antigène flagellaire qui entre dans la structure du flagelle permettant la mobilité de la bactérie.

⁶ Le SHU se manifeste par une anémie hémolytique (destruction des globules rouges), une thrombopénie (taux anormalement bas de plaquettes) et une insuffisance rénale aiguë.

⁷ Agent disparu des pays industrialisés.

Tableau I-3 : Principaux protozoaires présents dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Mode(s) de contamination
<i>Entamoeba histolytica</i>	Dysenterie amibienne	Ingestion
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiase	Ingestion
<i>Balantidium coli</i>	Dysenterie balantidienne	Ingestion
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Diarrhée, fièvre	Ingestion
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose	Ingestion / Inhalation
<i>Cyclospora</i>	Diarrhée, légère fièvre	Ingestion
<i>Microsporidium</i>	Diarrhée	Ingestion
<i>Naegleria</i>	Méningite	Inhalation
<i>Enterocytozoon spp.</i>	Diarrhée chronique, problèmes rénaux, musculaires, pulmonaires et oculaires	Ingestion

source : adapté de l'US-EPA (1992) ; Asano (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans Baumont (2004)



Helminthes



source : www.cnrs.fr

Figure I-4 : Helminthe vu au microscope électronique (pas d'échelle)

Les helminthes (figure I-4 et *tableau I-4*) sont des vers multicellulaires fréquemment rencontrés dans les eaux résiduaires. Tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes parasites. Dans les eaux usées urbaines, le nombre d'œufs d'helminthes peut être évalué entre 10 et 10³/L (Asano, 1998). Beaucoup d'helminthes ont des cycles de vie complexes comprenant un passage obligé par un hôte intermédiaire. Le stade infectieux de certains helminthes est l'organisme adulte ou larve, alors que pour d'autres, ce sont les œufs. Les œufs et les larves sont résistants dans l'environnement et le risque lié à leur présence est à considérer pour le traitement et la réutilisation des eaux résiduaires.

Tableau I-4 : Principaux helminthes présents dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Mode(s) de contamination
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariase	Ingestion
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Ancylostomiase	Ingestion/Cutanée
<i>Ancylostoma spp.</i>	Anémie	Ingestion/Cutanée
<i>Necator americanus</i>	Necatoriase	Cutanée
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Strongyloïdase	Cutanée
<i>Trichuris trichuria</i>	Trichuriase	Ingestion
<i>Taenia spp.</i>	Diarrhée, douleurs musculaires	Ingestion
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiase	Ingestion
<i>Hymenolepis</i>	Nervosité, troubles digestifs, ...	Ingestion
<i>Toxocara</i>	Fièvre, douleur abdominale	Ingestion
<i>Echinococcus granulosus</i>	Hydatidose	Ingestion

source : adapté de l'US-EPA (1992) ; Asano (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans Baumont (2004)



Facteurs de la pathogénicité chez les microorganismes

Les microorganismes présents dans l'environnement ou dans l'eau ne vont pas déclencher systématiquement une maladie s'ils sont absorbés. La pathogénicité dépend de plusieurs facteurs qui peuvent être regroupés sous deux catégories : la physiologie du microorganisme et celle de l'hôte infecté.

➤ Physiologie du microorganisme

La latence est la durée nécessaire pour qu'un pathogène devienne infectieux. Elle diffère selon les microorganismes. Ainsi, elle est faible (de nulle à 48 h) pour la majorité des virus, des bactéries et des protozoaires qui sont immédiatement infectieux dès qu'ils pénètrent dans l'hôte. En revanche, elle peut atteindre plusieurs semaines pour les helminthes en raison de la nécessaire maturité des œufs ou de leur passage imposé dans un hôte intermédiaire non humain.

Par ailleurs, dans des conditions favorables (pH, température, ensoleillement, ...) et suivant la nature du microorganisme (*tableau I-5*), les pathogènes peuvent survivre plusieurs semaines, voire plusieurs mois sur le sol, sur les plantes ou dans l'eau, ce qui présente un risque pour la santé publique non négligeable (OMS, 1989).

Tableau I-5 : Caractéristiques épidémiologiques de quelques agents pathogènes

Agents	Quantité excrétée par g de fèces	Latence	Survie	Dose Infectante DI 50 ⁸ (unité)
VIRUS				
Entérovirus	10 ⁷	qq heures	3 mois	< 100
Hépatite A	10 ⁶ ?	0	?	?
Rotavirus	10 ⁶ ?	0	?	?
BACTÉRIES				
Coliformes	10 ⁸	0	3 mois	+/- 10 ⁹
<i>Salmonella typhi</i> .	10 ⁸	0	2 mois	10 ⁷
Autres Salmonelles	10 ⁸	0	2-3 mois	10 ⁶
<i>Shigella</i>	10 ⁷	0	1 mois	10 ⁴
PARASITES				
Amibe dysent.	10 ⁷	0	25 jours	10 à 100
<i>Giardia lamblia</i>	10 ⁵	0	25 jours	10 à 100
<i>Ascaris</i>	10 ⁴	qq jours	> 1 an	quelques unités
<i>Taenia</i>	10 ⁴	qq mois	9 mois	1

source : d'après Feachem (1983) cité dans Faby (1997)

➤ Physiologie de l'hôte infecté : notion de Dose Minimale Infectieuse (DMI)

La DMI correspond à la quantité de pathogènes qui doit être absorbée pour que des symptômes de la maladie se manifestent chez quelques sujets au moins. Les DMI sont très variables selon le type biologique de l'agent (*tableau I-6*).

⁸ La DI 50 est la dose suffisante pour provoquer l'apparition de symptômes cliniques chez 50 % des individus soumis au test (source : d'après Feachem, 1983 cité dans Faby, 1997).

Tableau I-6 : DMI moyennes des agents pathogènes présents dans les eaux usées

Microorganisme	Dose Minimale Infectieuse (unité)
Bactéries	10^2 - 10^6
Virus	10^2
Protozoaires	10^1 - 10^2
Helminthes	1 - 10^1

source : Commission «assainissement» de l'AGHTM (1996) cité dans Baumont (2004)

La DMI est différente aussi en fonction des individus et de leur réaction physiologique face à la contamination. La réponse de l'hôte est extrêmement variable, elle dépend des caractéristiques des individus exposés aux pathogènes, comme l'âge, le sexe, voire l'activité : c'est la variabilité interindividuelle. Enfin, il peut y avoir une contamination entre individus. La contamination peut avoir lieu à cause d'individus malades, mais les pathogènes peuvent également être transportés par des porteurs sains, c'est-à-dire, des sujets infectés mais non malades, qui excrètent l'agent pathogène autour d'eux sans que des signes d'alerte en permettent le diagnostic.



Composition microbiologique d'une eau usée

Les eaux usées contiennent une grande variété de microorganismes pathogènes qu'on ne peut évaluer individuellement. Pour cette raison, à défaut de démontrer leur présence, on recherche des germes indicateurs dont la persistance dans le milieu aquatique est proche de celle des principaux organismes pathogènes d'origine entérique retrouvés dans les eaux usées. Le tableau I-7 présente une évaluation des concentrations des microorganismes pathogènes dans l'eau et mentionne les organismes indicateurs pour chaque groupe.

Tableau I-7: Composition microbiologique d'une eau résiduaire urbaine « classique »

Organismes	Concentration (unité / L)	Organismes indicateurs de pathogènes humains	Concentration maximale
(d'après WHO <i>et al.</i> , 2006)		(d'après Asano <i>et al.</i> , 2007)	
Virus Virus entériques Rotavirus	$10^5 - 10^6$ $10^2 - 10^5$	Virus bactériophages Coliphages somatiques Coliphages RNA-F	10^4 UFP ⁹ / 100 mL
Bactéries Coliformes thermotolérants <i>Campylobacter jejuni</i> <i>Salmonella</i> spp. <i>Shigella</i> spp. <i>Vibrio cholerae</i>	$10^8 - 10^{10}$ $10 - 10^4$ $1 - 10^5$ $10 - 10^4$ $10^2 - 10^5$	Bactéries Coliformes thermotolérants <i>E. coli</i> Entérocoques intestinaux	10^9 UFC ¹⁰ / 100 mL 10^8 UFC : 100 mL
Protozoaires <i>Cryptosporidium parvum</i> <i>Entamoeba histolytica</i> <i>Giardia intestinalis</i> Helminthes <i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Ancylostoma duodenale</i> / <i>Necator americanus</i> <i>Trichuris trichiura</i>	$1 - 10^4$ $1 - 10^2$ $10^2 - 10^5$ $1 - 10^3$ $1 - 10^3$ $1 - 10^2$	Protozoaires <i>Clostridium perfringens</i> Helminthes Œufs d' <i>Ascaris</i>	10^5 UFC / 100 mL 10^3 œufs / 100 mL

NOTA : pour les bactéries, les indicateurs Coliformes Totaux comptabilisent les contaminations à la fois d'origines fécale et environnementale. C'est pourquoi, pour déterminer d'éventuelles contaminations d'origine humaine, la quantification porte sur *E. coli* / coliformes thermotolérants, plus spécifiques.

⁹ UFP : Unité Formant Plage

¹⁰ UFC : Unité Formant Colonie

Ces indicateurs sont essentiellement représentés par *E. coli*, les coliformes thermotolérants et les entérocoques dont la survie se rapproche de celles de bactéries pathogènes d'origine intestinale. Les œufs d'*Ascaris* ont été retenus comme indicateurs des helminthes. Pour les virus et les protozoaires, il a été proposé de rechercher des bactériophages (coliphages somatiques et coliphages RNA-F) et *Clostridium perfringens*, respectivement (Asano *et al.*, 2007) mais la recherche de ces indicateurs n'a qu'une valeur indicative et peut être remise en question dans la mesure où leur persistance dans l'environnement peut être différente de celle des virus entériques et des kystes de protozoaires.

La dernière colonne du *tableau I-7* regroupe les concentrations maximales en microorganismes dans une eau usée. La plupart des documents consultés donnent des gammes de concentrations en microorganismes et non des concentrations fixes. Pour des raisons pratiques, il a été décidé de conserver à chaque fois la concentration la plus élevée, ceci afin de se placer dans le cas le plus défavorable.

Les valeurs indiquées seront ensuite conservées dans toute la suite de ce rapport et notamment pour l'identification de la (des) technique(s) de traitement adaptée(s) à un usage souhaité et à une qualité requise.

2. Eléments traces

Parmi les éléments traces, on distingue ceux dit minéraux (ou inorganiques) tels que les éléments traces métalliques et ceux dit organiques tels que les pesticides par exemple.



Micropolluants inorganiques

➤ Présentation générale

Les eaux usées d'origine urbaine peuvent contenir des éléments minéraux (toxiques ou non) et notamment des éléments traces métalliques. Ces micropolluants proviennent essentiellement :

- des produits consommés par la population ;
- de la corrosion des matériaux utilisés dans les réseaux de distribution et d'assainissement ;
- des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire¹¹ ;
- d'activités de service (santé, automobile, ...) et de rejets industriels raccordés au réseau.

Même en l'absence de rejets industriels, les effluents urbains peuvent contenir des micropolluants minéraux en quantité variable. Choubert *et al.* (2009) fournissent un ordre de grandeur des concentrations (*tableau I-8*) de ces polluants dans les eaux usées urbaines dans le cadre d'une étude réalisée sur 5 stations de traitement des eaux usées (STEU).

¹¹ Par opposition au réseau séparatif, un réseau unitaire collecte dans une même canalisation les eaux usées d'origines domestique (et éventuellement non domestiques) et les eaux pluviales.

Tableau I-8 : Gammes de concentration totale (en µg/L) de quelques éléments chimiques présents dans les eaux usées urbaines

Concentration totale (µg/L)	Eléments
< 1	Cadmium, Antimoine, Uranium, Mercure ^a
[1 ; 10]	Lithium, Cobalt, Arsenic, Sélénium, Molybdène, Etain, Plomb
[10 ; 100]	Titane, Chrome, Nickel, Cuivre, Rubidium, Baryum
[100 ; 1 000]	Bore, Fer, Zinc
[1 000 ; 2 000]	Aluminium

(a) : donnée ajoutée de *Commission «assainissement» de l'AGHTM*, 1996

Pour en apprendre un peu plus sur les micropolluants minéraux considérés comme les plus dangereux par *Vilaginès* en 2003 (le plomb, l'arsenic, le mercure, le cadmium et le nickel), des informations complémentaires sont fournies dans l'*ANNEXE E*.

➤ *Devenir des micropolluants minéraux*

L'épandage ou l'irrigation d'eau usée (traitée) vont contribuer à l'enrichissement des sols en micropolluants minéraux. Certains de ces éléments traces peuvent être reconnus nécessaires au développement des végétaux (en très faibles quantités) et d'autres beaucoup moins. L'impact négatif de cet apport peut se présenter sous plusieurs aspects :

- atteinte à l'activité microbologique du sol (pouvant entraîner un ralentissement de l'humidification de la matière organique, du métabolisme de l'azote, ...) ;
- phytotoxicité (malformations, chlorose¹², retard voire absence de croissance, ...) ;
- zootoxicité (accumulation des éléments traces métalliques dans les tissus d'animaux sauvages).

Le comportement de chaque métal dépend du type de liaisons avec les constituants du sol et de son aptitude à être absorbé par la végétation, variable selon les espèces végétales. D'après *Colin cité dans Commission «assainissement» de l'AGHTM (1996)*, l'échelle de sensibilité des végétaux à l'accumulation des métaux est la suivante (par ordre décroissant) : champignons, cultures légumières, betterave à sucre, pommes de terre, céréales et cultures industrielles, graminées fourragères. De plus, l'accumulation n'est pas réalisée de manière homogène sur toute la plante et, en général, les teneurs décroissent dans l'ordre suivant : racine, tige, feuille, fruit.

Concernant les effets de ces minéraux sur les animaux, les tissus non musculaires sont les plus concernés par la fixation des éléments traces métalliques, en particulier ceux du foie et des reins (*Commission «assainissement» de l'AGHTM, 1996*). Le *tableau I-9* présente un classement des différents éléments chimiques en fonction de leur toxicité potentielle et/ou de leur intérêt.

¹² La chlorose est une décoloration plus ou moins prononcée des feuilles (jaunissement) par manque de chlorophylle.

Tableau I-9 : Classification d'éléments chimiques minéraux en fonction de leur intérêt et de leur toxicité potentielle

Oligo-éléments indispensables aux végétaux ou animaux	Eléments essentiellement phytotoxiques	Eléments essentiellement toxiques pour les animaux et pour l'homme	Eléments simultanément toxiques pour les végétaux et les animaux
Bore Cobalt Cuivre Molybdène Sélénium Zinc	Bore Cadmium Cobalt Cuivre Lithium Nickel Etain Zirconium	Arsenic Baryum Bismuth Cadmium Molybdène Plomb Sélénium Cuivre*	Argent Cadmium Antimoine Béryllium Chrome Fluor Mercure

* : la toxicité du cuivre est variable chez les animaux

source : Commission «assainissement» de l'AGHTM, 1996

➤ Cas du bore

Le bore est un élément naturellement très présent dans l'environnement et c'est pourquoi il mérite un intérêt particulier. On le retrouve combiné avec l'oxygène ou avec d'autres éléments dans des composés appelés borates. L'homme est exposé au bore et aux borates à travers les aliments, l'eau de boisson et certains autres produits de consommation. Les borates dissous dans l'eau peuvent s'adsorber sur diverses surfaces présentes dans les rivières et autres cours d'eau ou s'en désorber. Les borates sont également adsorbés sur des particules du sol. Le degré d'adsorption dépend du type de sol.

A propos de son mode d'action, le bore agit de la même manière sur l'homme et sur les autres mammifères. Une fois inhalé ou absorbé, le bore se répand à travers tout le corps et une partie est incorporée dans les os. Le bore est ensuite rapidement excrété, sauf le bore dans les os qui prend plus de temps à être éliminé. Les rares études sur les êtres humains ont révélé que l'exposition à court terme au bore peut entraîner une irritation des yeux, des voies respiratoires supérieures et du nasopharynx (WHO, 1998). Cette irritation disparaît quand il n'y a plus d'exposition. Aucun effet à long terme ni aucun effet sur la fertilité humaine d'une exposition au bore n'a été observé.

Concernant sa présence dans les eaux usées, le bore provient surtout des lessives et des rejets industriels. A des concentrations très faibles, le bore est indispensable à la croissance des végétaux ; ces besoins sont largement couverts par les eaux usées mais lorsque sa concentration excède 0,3 mg/L, il peut être toxique pour les plantes les plus sensibles (tableau I-10).

Tableau I-10 : Concentrations maximales en bore (B) dans l'eau d'arrosage basées sur l'apparition de symptômes de toxicité lors de cultures sur sable

Sensible 0,3 – 1 mg de B/L	Tolérance moyenne 1 – 2 mg de B/L	Tolérant 2 – 4 mg de B/L
Agrumes	Poivron	Carotte
Avocatier	Avoine	Laitue
Abricotier	Petit pois	Choux
Pêcher	Maïs	Navet
Cerisier	Blé	Oignon
Figuier	Orge	Luzerne
Raisin	Radis	Betteraves
Pommier	Tomate	Asperges
Prunier	Tournesol	
Artichaut		

source : Faby (1997) à partir de Shainberg et Oster (1978)



Micropolluants organiques

➤ Présentation générale

Les micropolluants organiques identifiés dans les eaux usées proviennent, en France, essentiellement de l'utilisation domestique de détergents, pesticides, solvants et également des eaux pluviales : ruissellement sur les toitures, les terres agricoles, le réseau routier, ... Ils peuvent aussi provenir de rejets industriels lorsque ceux-ci ont lieu dans le réseau d'assainissement ou se former lors des traitements de désinfection par le chlore (haloforme).

Parmi les micropolluants organiques les plus connus, on peut citer les PCB (PolyChloroBiphényles), les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), les OHV (Organo Halogénés Volatils) ou les produits phytosanitaires (pesticides par exemple).

De nos jours, de nouvelles substances font l'objet de recherches poussées. Ceci est notamment le cas des produits pharmaceutiques, des produits de soins corporels ou même des hormones. Le *tableau I-11* donne un ordre de grandeur des concentrations médianes de quelques uns de ces produits dans les eaux usées.

Tableau I-11 : Concentrations médianes (en ng/L) de quelques molécules organiques retrouvées dans les eaux usées et dans les eaux de surface

	Composés organiques	Concentration entrée STEU* (ng/L)	Concentration sortie STEU* (ng/L)	Rivière (ng/L)	Pays	Source
Hormones	Estrone (E1)	35	16	8	Italie (Rome)	Lagana <i>et al.</i> , 2004
		16 à 90	0,2 à 11	-	Europe	Johnson <i>et al.</i> , 2005
	17 β-Estradiol (E2)	25	6	4	Italie (Rome)	Lagana <i>et al.</i> , 2004
		-	0,6 à 5,7	-	Europe	Johnson <i>et al.</i> , 2005
	Estriol (E3)	31	1	1	Italie (Rome)	Lagana <i>et al.</i> , 2004
	17 α-Ethinylestradiol (EE2)	-	-	3	Italie (Rome)	Lagana <i>et al.</i> , 2004
		-	0,8 à 2,8	-	Europe	Johnson <i>et al.</i> , 2005
Phénols	Nonylphénol (NP)	6 573	1 649	1 364	Italie (Rome)	Lagana <i>et al.</i> , 2004
		-	n.a à 1 310	-	Europe	Johnson <i>et al.</i> , 2005
	Bisphénol A (BPA)	339	36	22	Italie (Rome)	Lagana <i>et al.</i> , 2004
PCB	13 PCB	4,3	1,4	-	Canada (Montréal)	Pham et Proulx, 2007
HAP	21 HAP	1 500	400	-	Canada (Montréal)	Pham et Proulx, 2007
Ecranc UV a,b	Benzophénone-3 (BP-3)	720 à 7 800	53 à 690	-	Suisse	Balmer <i>et al.</i> , 2005
	4-Methylbenzylidene Camphor (4-MBC)	560 à 6 500	200 à 2 700	-	Suisse	Balmer <i>et al.</i> , 2005
	Ethylhexyl Methoxy-Cinnamate (EHMC)	480 à 18 800	13 à 72	-	Suisse	Balmer <i>et al.</i> , 2005
	Octocrylene (OC)	133 à 11 700	6 à 123	-	Suisse	Balmer <i>et al.</i> , 2005

* n.a : donnée non acquise ; - : absence de données

(a) Les noms des composés qui suivent sont ceux définis par l'INCI : International Nomenclature of Cosmetic Ingredients

(b) Pas d'indications sur des concentrations moyennes ou médianes

L'ANNEXE F fournit des informations plus complètes sur les micropolluants organiques. De plus, l'ANNEXE G donne des indications sur les concentrations médianes de produits pharmaceutiques et de produits de soins corporels dans les eaux usées.

➤ *Devenir des micropolluants organiques*

Dans le sol, ces micropolluants restent liés à la matière organique ou adsorbés sur les particules du sol. Cependant, quelques composés ioniques (pesticides organochlorés, solvants chlorés, ...) peuvent être entraînés en profondeur.

Il faut surveiller de près les substances émergentes telles que les résidus hormonaux, d'aspirine, ... ces produits auraient un effet néfaste sur le milieu aquatique (les produits hormonaux seraient susceptibles de modifier le sexe des poissons), ce qui engage donc à être prudent lors de la réutilisation des eaux usées traitées (impacts inconnus sur l'homme).

En cas d'usage à des fins agricoles, il semble que les plantes soient susceptibles d'absorber certains composés organiques mais une amélioration des connaissances à ce sujet est requise, tout particulièrement afin d'évaluer l'effet de ces composés absorbés.

3. Salinité

Le principal critère d'évaluation de la qualité d'une eau naturelle dans la perspective d'un projet d'irrigation est sa concentration totale en sels solubles. La concentration en sels totaux de l'eau usée excède celle de l'eau potable d'environ 200 mg/L, sauf dans le cas de pénétration d'eaux saumâtres dans les réseaux d'assainissement (principe du biseau salé¹³) ou lors de collecte d'eaux industrielles. Les conséquences d'une salinité excessive de l'eau d'irrigation se présentent sous 2 catégories :

- les dommages vis-à-vis des sols et donc, indirectement, vis-à-vis des rendements culturaux ;
- et les dommages causés aux cultures.

Parmi les éléments entrants en jeu dans la salinité des eaux usées réutilisées, on peut citer le sodium et le chlore qui sont responsables, en grande partie, de la salinisation des sols et le bore dans une moindre mesure (abordé précédemment). Le sodium étant sujet à une accumulation significative sur les sols (sodisation), il fera l'objet d'une attention toute particulière dans cette partie.



Salinisation

Les plantes prélèvent l'eau du sol en y abandonnant une large part des sels apportés par l'eau d'arrosage ce qui conduit à augmenter la salinité de l'eau du sol. Les conséquences de l'évaporation sont les mêmes. La pression osmotique de l'eau du sol augmentant avec sa concentration en sels dissous, la plante consacre alors l'essentiel de son énergie non pas à se développer, mais à ajuster la concentration en sels de son tissu végétal de manière à pouvoir extraire du sol l'eau qui lui est nécessaire. *Richards cité dans Faby (1997)* a établi une échelle de qualité des eaux d'irrigation en fonction de leur salinité évaluée par leur conductivité électrique (*tableau I-12*).

¹³ Entrée d'eau de mer ou d'eau saumâtre dans un estuaire ou une nappe phréatique et qui, parfois, rejoint les réseaux d'assainissement en tant qu'eau parasite et augmente sensiblement la conductivité du milieu.

Tableau I-12 : Classes de qualité de salure de l'eau d'irrigation (d'après Faby, 1997)

Qualité de l'eau	Conductivité de l'eau (µS/cm)	Sels solubles correspondants estimés en NaCl (mg/L)
I. Excellente	250	< 160
II. Faible salinité	250- 750	160 - 500
III. Forte salinité	750 – 2 250	500 – 1 500
IV. Très forte salinité	2 250 – 5 000	1 500 – 3 600

A titre purement indicatif, l'eau de mer possède une conductivité voisine de 55 000 µS/cm, ce qui équivaut à une concentration en chlorure de sodium (NaCl) de l'ordre de 35 g/L, soit une eau environ 10 fois plus salée que celle de qualité IV (tableau I-12 : « très forte salinité »). Cette valeur caractérise donc les inconvénients d'un arrosage direct avec de l'eau de mer. En ce qui concerne les eaux usées, la conductivité est nettement plus faible puisque voisine de 1 100 µS/cm. Bien que sa qualité soit de niveau III (tableau I-12 : « forte salinité »), il semble qu'elle ne constitue pas un obstacle à l'exploitation agricole par exemple.

La tolérance de quelques plantes vis-à-vis de la salinité de l'eau d'irrigation est reportée au tableau I-13. Pour un rendement donné, les cultures sont classées par ordre de sensibilité décroissante.

Tableau I-13 : Rendements de quelques cultures en fonction de la salinité de l'eau d'arrosage (exprimée en µS/cm)

<i>Culture</i> \ <i>Rendement</i>	100 %	90 %	75 %	50 %	0 %
Oignon	800	1 200	1 800	2 900	5 000
Pommes de terre	1 100	1 700	2 500	3 900	6 700
Maïs	1 100	1 700	2 500	3 900	6 700
Choux	1 200	1 900	2 900	4 200	6 800
Luzerne	1 300	2 200	3 600	5 900	10 000
Tomate	1 700	2 300	3 400	5 000	8 400
Concombre	1 700	2 200	2 900	4 200	6 800
Fétuque	2 600	3 600	5 200	7 800	13 000
Blé	4 000	4 900	6 300	8 700	13 000
Sorgho	4 500	5 000	5 600	6 700	8 700
Betterave sucrière	4 700	5 800	7 500	10 000	16 000
Orge	5 300	6 700	8 700	12 000	19 000

source : Faby (1997) [lui-même étant adapté de Mass et Hoffman (1977) et Mass (1984)]

En dessous de 800 µS/cm, il n'y a pratiquement pas de culture dont le rendement soit affecté par la salinité ; entre 800 et 5 300 µS/cm, le maintien des rendements est encore possible avec des pratiques culturales adéquates.

Quand une tendance à l'enrichissement en sels de la solution du sol menace les rendements cultureux, elle doit être compensée par des irrigations supérieures aux besoins en eau de la culture pour entraîner la solution du sol excessivement enrichie en ions en dessous de la zone racinaire. Si la perméabilité du sol n'est pas suffisante, un drainage doit être prévu.

Le choix du mode d'irrigation doit aussi tenir compte de la salinité de l'eau d'arrosage. L'irrigation à la raie est déconseillée, par contre, l'irrigation par submersion ou l'irrigation localisée donnent de bons résultats.



Chlore et sodium

Les chlorures (Cl) et le sodium (Na) peuvent également poser problème, notamment en bord de mer, quand les réseaux drainent des eaux phréatiques saumâtres.

Certaines cultures, comme la vigne, les agrumes, les noyers, l'avocatier et le haricot, les groseilliers, les fraisiers et, d'une manière générale, les fruits à pépins et à noyaux, sont sensibles à des concentrations relativement faibles en sodium Na.

La plupart des arbres et autres plantes ligneuses pérennes sont sensibles au chlore à faible dose, alors que la plupart des cultures annuelles le sont moins. Les effets toxiques apparaissent beaucoup plus facilement quand les sels sont apportés directement sur les feuilles lors des irrigations par aspersion. C'est particulièrement vrai pour le chlore et le sodium. Quelques valeurs de tolérances au chlore et au sodium sont données au *tableau I-14*.

Tableau I-14 : Concentrations en Na et Cl de l'eau d'aspersion provoquant des brûlures des feuilles

Concentrations en Na et Cl (meq/L)			
Moins de 5	Entre 5 et 10	Entre 10 et 20	Plus de 20
Amandier	Raisin	Orge	Choux fleur
Abricotier	Pomme de terre	Blé	Betterave sucrière
Agrumes	Tomates	Concombre	Tournesol
Prunier	Gazons de golf	Sorgho	

source : Faby (1997) à partir de Maas (1984)

Quand le résiduel en chlore est trop élevé au moment de l'irrigation, les cultures peuvent souffrir si elles sont arrosées par aspersion. Une concentration en chlore résiduel inférieure à 1 mg/L est sans danger pour le feuillage, mais une concentration supérieure à 5 mg/L serait dommageable.



Sodisation

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Le phénomène d'accumulation de sodium dans les sols s'appelle la sodisation. Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace les ions calcium et magnésium adsorbés sur les argiles de sol et cause la dispersion des particules dans le sol. Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure. Ce problème est également relié à plusieurs facteurs tels que le taux de salinité et le type de sol. Par exemple, les sols sableux ne subiront que peu de dommage en comparaison aux plus lourds quand ils sont irrigués avec de l'eau à haut Rapport d'Adsorption du Sodium (RAS ou SAR¹⁴ en anglais).

¹⁴ Le SAR correspond à une valeur, sans unité, définie de façon empirique par la formule : $C_{Na+} / \sqrt{[(C_{Ca2+} + C_{Mg2+})/2]}$ où C désigne la concentration des espèces ioniques, exprimée en meq/L.

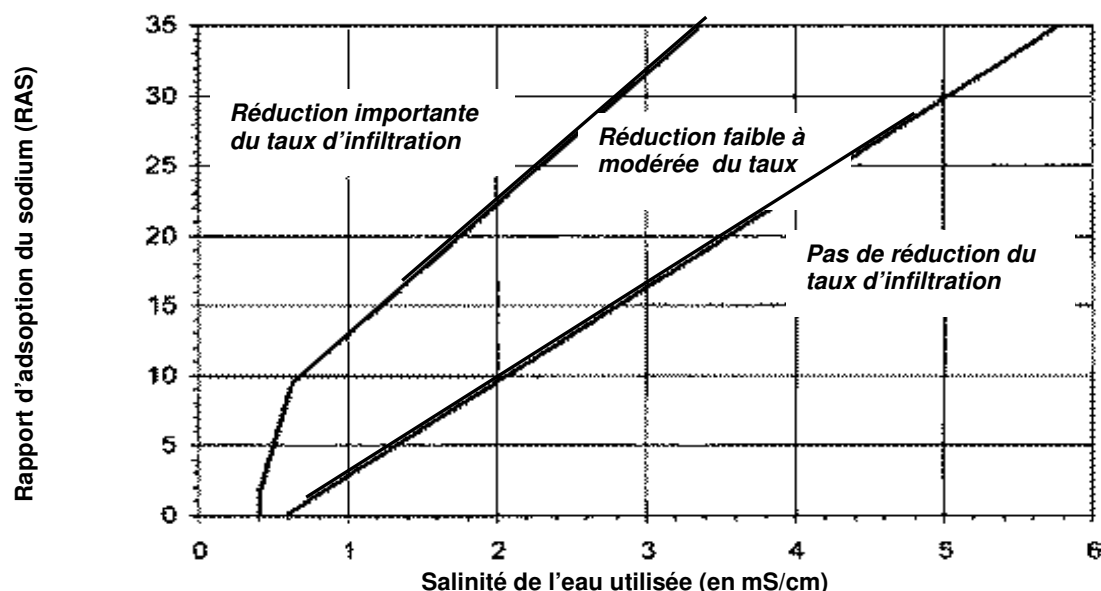
Pour mieux cerner l'importance et l'impact de cette variable, un graphique pertinent présentant l'évolution du taux d'infiltration en fonction de la salinité de l'eau employée et du RAS est proposé sur la *figure I-5*. Le *tableau I-15* reprend les mêmes éléments.

Tableau I-15 : Influence de la salinité et du RAS sur le taux d'infiltration

	RAS					Influence sur le taux d'infiltration
	0-3	3-6	6-12	12-20	20-40	
Salinité de l'eau (mS/cm)	> 0,7	> 1,2	> 1,9	> 2,9	> 5	Nulle
	0,7	1,2	1,9	2,9	5	Faible
	0,2	0,3	0,5	1,3	2,9	Modérée
	< 0,2	< 0,3	< 0,5	< 1,3	< 2,9	Sévère

source : www.lenntech.com

D'après le *tableau I-15* ou la *figure I-5*, pour une eau faiblement salée (faible conductivité) et un RAS faible, l'influence sur le taux de filtration peut être sévère et conduire à une réduction significative.



source : www.lenntech.fr

Figure I-5 : Evolution du taux d'infiltration en fonction de salinité de l'eau et du RAS

Les problèmes pour les récoltes, provoqués par un excès de Na, sont la formation de lit de croûte de graines, une saturation temporaire à la surface du sol, un pH élevé et une possibilité accrue de présence de maladies, des herbes, d'érosion des sols, de manque d'oxygène et de disponibilité nutritive insatisfaisante. L'eau recyclée peut être une source d'excès en Na dans le sol par rapport à d'autres cations (calcium, potassium, magnésium) et doit donc faire l'objet de contrôles.

4. Autres paramètres



Substances nutritives

L'azote, le phosphore, le potassium et les oligo-éléments indispensables à la vie des végétaux, se trouvent en quantités appréciables, mais en proportions très variables par rapport aux besoins de la végétation, dans les eaux usées traitées ou non. D'une façon générale, un volume d'eau usée traitée et réutilisée de 1 000 m³, soit un apport d'une lame d'eau résiduaire de 100 mm à l'hectare, peut apporter (d'après *Faby, 1997*) :

- de 16 à 62 kg d'azote ;
- de 2 à 69 kg de potassium ;
- de 4 à 24 kg de phosphore ;
- de 18 à 208 kg de calcium ;
- de 9 à 100 kg de magnésium ;
- et de 27 à 182 kg de sodium.

Dans certaines circonstances, ces éléments peuvent être en excès par rapport aux besoins de la plante et provoquer des effets négatifs, aussi bien au niveau de la culture que des sols. Un contrôle périodique de la quantité de nutriments présents dans l'effluent est nécessaire afin d'en tenir compte lors du calcul des besoins en fertilisants des cultures irriguées.



Azote

L'usage d'eaux usées en irrigation peut faire craindre un excès d'apports azotés. Cet excès se réfère d'une part aux tolérances de la végétation cultivée et, d'autre part, aux risques de pollution des nappes phréatiques sous-jacentes. En effet, dans certains cas défavorables, un apport d'azote excédentaire par rapport aux besoins des cultures, peut provoquer dans un sol très perméable la contamination des eaux souterraines. Il est donc souhaitable que les apports d'azote ne soient pas disproportionnés par rapport à l'assimilation par la culture et l'éventuel usage d'une nappe phréatique à des fins d'alimentation en eau des populations ou des animaux. Ceci impose des contraintes qu'un projet de réutilisation d'effluents urbains doit prendre en compte.

L'azote en quantité excessive peut également entraîner des effets néfastes sur la production tel qu'un retard dans la maturation de certaines cultures, abricots, agrumes, avocats, vigne par exemple, altérer leur qualité, comme par exemple réduire la teneur en sucre des fruits ou des betteraves, accentuer la sensibilité des cultures aux maladies, la tendance à la verse pour les céréales, limiter le développement des jeunes racines,



Phosphore

La concentration en phosphore dans les effluents secondaires varie de 6 à 15 mg/L (soit 15 à 35 mg/L en P₂O₅), à moins que l'élimination du phosphore ne soit assurée durant le traitement. La concentration en phosphore dans les eaux usées est habituellement trop faible pour avoir un impact sur le rendement. Dans les rares cas d'apports en excès, le phosphore est alors pour l'essentiel retenu dans le sol par des réactions d'adsorption et de précipitation ; cette rétention est d'autant plus effective que le sol contient des oxydes de fer, d'aluminium ou du calcium en quantités importantes.



Potassium

La concentration en potassium dans les effluents secondaires varie de 10 à 30 mg/L (12 à 36 mg/L de K₂O) et permet donc de répondre partiellement aux besoins. Il faut noter cependant que, s'il existe, un excès de fertilisation potassique conduit à une fixation éventuelle du potassium, à un état très difficilement échangeable et/ou à une augmentation des pertes par drainage en sols légers.



Matières en suspension et matière organique

Les matières en suspension (MES) sont en majeure partie de nature biodégradable. La plus grande part des microorganismes pathogènes contenus dans les eaux usées est transportée par les MES. Les particules en suspension, plus lourdes que l'eau, sont éliminées par décantation. Toutefois, un traitement beaucoup plus poussé est généralement requis pour faire face aux risques sanitaires.

Une présence excessive de matières en suspension peut entraîner des difficultés de transport et de distribution des effluents ainsi que le bouchage des systèmes d'irrigation.

La présence de matière organique dans les eaux usées ne constitue pas, sauf cas très particulier, un obstacle à la réutilisation de ces eaux. Bien au contraire, elle contribue à la fertilité des sols. Cependant, l'expérience montre que le maintien d'une concentration importante en matière organique dans les eaux usées gêne considérablement l'efficacité des traitements destinés à éliminer les germes pathogènes. Enfin, les concentrations significatives en matière organique peuvent aussi entraîner des odeurs désagréables, notamment si les eaux stagnent à la surface du sol.

Tous ces paramètres font l'objet, dans le cadre d'un projet de REUT, d'une attention particulière puisqu'ils représentent un risque pour la santé humaine, animale et pour l'environnement. Cette notion de risque, récurrente dans la réutilisation des eaux, est abordée ci-après.

5. Contrainte de qualité des eaux : la notion de risque



Définition du risque

Les études d'estimation du risque distinguent deux types de risque : le risque potentiel et le risque réel (*Devaux (1999) cité dans Baumont (2004)*). Le risque potentiel comprend lui-même le risque théorique et le risque expérimental.

Le risque théorique, également appelé danger, est défini par le critère d'absence ou de présence d'un contaminant (microorganisme, micropolluant métallique, ...). Il dépend de la population qui produit les eaux usées et d'autres facteurs (présence de rejet industriel, réseau unitaire, ...). Son calcul, réalisé à partir de la probabilité d'infection en fonction de la dose, est une approche de haute technicité, coûteuse et permettant d'estimer des risques pour la santé publique très faibles (*Monchalain (1999) repris et complété par Aviron-Violet, 2002*).

Le risque expérimental est le risque que le contaminant soit transmis à un individu. Il dépend de la dose de départ, de l'efficacité du traitement, de la capacité de survie (pour les microorganismes) ou de rétention (pour les micropolluants) et de la dose minimale nécessaire pour contaminer un individu (*i.e.* dose infectante pour les microorganismes et seuil de toxicité pour les micropolluants).

Le risque réel « correspond à la probabilité [d'être contaminé] dans une population exposée » (*Devaux (1999) cité dans Baumont (2004)*). Il dépend des facteurs liés au risque potentiel, et dépend également des « capacités immunitaires de l'individu (naturelles ou acquises), ainsi que d'autres facteurs comme l'âge, le sexe, l'état de santé, la nutrition, l'hygiène et la capacité diagnostique (clinique, sérologique et portage) des acteurs de santé ». Sa détermination, réalisée à partir d'études épidémiologiques, est une approche de technicité relativement simple, d'un coût réduit et permettant de maîtriser le risque (*Monchalin (1999) repris et complété par Aviron-Violet, 2002*).

Après ces brèves définitions de la notion de risque dans sa globalité, il convient de s'intéresser aux risques intrinsèquement liés à une réutilisation des eaux comme les risques microbiologique, chimique et environnemental.



Risque microbiologique

Dans le cas de l'agriculture, les microorganismes se retrouvent à la surface des plantes et sur le sol. Les feuilles et la plante créent un endroit frais, humide (évapotranspiration) et à l'abri du soleil. Une contamination peut donc avoir lieu au moment de la croissance des végétaux ou même de la récolte.

Le mode d'irrigation joue également un rôle non négligeable dans la définition du risque microbiologique : en effet, l'irrigation souterraine ou gravitaire peut nuire à la qualité des eaux souterraines et de surface. L'irrigation par aspersion crée des aérosols pouvant être gênants pour la santé humaine. De plus, des contaminations directes peuvent également avoir lieu lors de la maintenance du système d'irrigation.

D'après *Commission «assainissement» de l'AGHTM (1996) cité dans Baumont (2004)*, les populations humaines telles que les consommateurs de légumes crus, les consommateurs de viande bovine insuffisamment cuite, les travailleurs agricoles et les populations avoisinantes, sont exposées à une pathologie associée de manière certaine à une utilisation agricole d'effluents bruts ou traités.

La *Commission «assainissement» de l'AGHTM (1996) cité dans Baumont (2004)* estime que les helminthes (ascaris, trichocéphales, ankylostomes, ...) représentent le risque microbiologique principal, suivi par les affections bactériennes (choléra et shigellose dans les pays en cours de développement) à moindre échelle et enfin, de façon très limitée, les virus.



Risque chimique

Les faibles concentrations en micropolluants dans les eaux usées traitées peuvent être un frein à la recharge d'aquifère. Même en faibles quantités, ces éléments présentent des risques de toxicité humaine à court terme et de maladies à plus long terme.

En cas d'usage agricole, la seule voie de contamination réellement préoccupante par les éléments traces est la consommation de plantes cultivées, dans lesquelles ils s'accumulent. Le danger réside donc dans la consommation de végétaux contaminés. Toutefois, certains de ces éléments peuvent être intéressants pour la croissance végétale et il convient de trouver un équilibre entre le risque sanitaire et l'intérêt agronomique.

Le risque posé par les effets à long terme de ces produits, pour lesquels il n'existe souvent aucune étude, est encore inconnu. De même, l'apparition de nouvelles substances toxiques n'est pas à exclure et il faut rester prudent, surtout vis-à-vis d'eaux usées traitées urbaines qui, dans certains cas, pourraient avoir des caractéristiques chimiques différentes et des concentrations plus importantes. Enfin, il ne faut pas oublier que les éléments traces ont tendance à s'accumuler dans les boues de STEU plutôt que dans l'eau traitée ; le risque chimique semble alors moindre.

Pour une réutilisation à des fins industrielles, la concentration admissible en sels, les molécules organiques et les éléments traces métalliques doivent faire l'objet d'une attention particulière (*Monchalín (1999) repris et complété par Aviron-Violet, 2002*).



Risque environnemental

Le risque environnemental s'inscrit à la fois dans une optique de protection des ressources en eau et de préservation du sol. De plus, ce risque est intimement lié aux deux précédents.

Dans un contexte agricole, l'influence d'un excès de bore et d'autres éléments traces éventuels, l'affectation du rendement par la salinité, le risque d'alcalinisation des sols par excès de sodium, un résiduel en chlore trop important, un excès de nutriments (azote, phosphore, potassium) ou les brûlures de feuille par le sel en cas d'aspersion, doivent être pris en considération (*Monchalín (1999) repris et complété par Aviron-Violet, 2002*). Cependant, pour le sol, il ne faut pas perdre de vue qu'il existe une capacité de rétention (adsorption pour les molécules ou ions, compétition trophique pour les microorganismes) et une capacité d'épuration (valable également pour les cours d'eau dans une moindre mesure).

Les paramètres devant être pris en compte dans tout projet de réutilisation des eaux viennent d'être décrits. Certains doivent faire l'objet de plus d'attention que d'autres, notamment par rapport aux risques qu'ils présentent pour l'Homme et l'Environnement.

La partie suivante présente les technologies de traitement des eaux usées rencontrées « habituellement » en réutilisation des eaux. La question de leur efficacité sur les différents paramètres sera abordée ainsi que d'autres technologies rencontrées en REUT à moindre échelle ou trouvées couramment dans les filières d'épuration « classiques » et qui mériteraient d'être considérées en projet de réutilisation.

II. Recommandations / Réglementations

1. Réglementations européennes ayant des liens indirects avec la REUT

A l'échelle Européenne, il n'existe pas de directive spécifique à la réutilisation des eaux usées.

Si seule la Directive Eaux Résiduaires Urbaines 91/271/CEE de 1991 explicite l'intérêt de la réutilisation des eaux usées traitées en encourageant l'irrigation agricole sous certaines conditions, la réutilisation des eaux usées domestiques traitées est implicitement encadrée au travers de diverses Directives Européennes.

Dans le cadre d'une approche globale de la gestion des eaux, la Commission Européenne, par l'intermédiaire du Groupe de Travail « Mediterranean Wastewater Reuse » fait état des impacts éventuels de différentes directives en lien avec divers types d'usage d'eaux usées traitées. Ces éléments sont mentionnés dans le *tableau II-1* et commentés en *ANNEXE J*.

Tableau II-1 : Impact implicite des directives européennes sur la REUT

Usage	Risque Principal	A	B	C*	D	E	F	G	H
Irrigation agricole	Contamination du sol et des eaux souterraines par des substances chimiques et/ou biologiques dangereuses Risque sanitaire : travailleurs / consommateurs	X	X	X	X				
Recharge de nappe souterraine	Risque sanitaire si réutilisation indirecte pour eau potable		X	X	X				
Usages urbains	Risque sanitaire pour les personnes exposées		X	X	X				
Eau potable voies indirectes	Risque sanitaire			X	X		X		
Loisirs	Risque sanitaire pour les personnes exposées					X			
Amélioration de l'environnement	Altération des biocénoses						X	X	
Aquaculture	Contamination de l'eau et de la production par des substances chimiques et/ou biologiques dangereuses							X	X

A Directive 86/278/EEC

B Directive 91/676/EEC

C Directive 2006/118/EC

D Directive 80/778/EC puis 98/83/EC

E Directive 2006/7/EC

F Directive 75/440/EEC abrogée en 2007

G Directive 78/659/EEC abrogée en 2007 et remplacée par la 2006/44/CE

H Directive 79/923/EEC remplacée par 2006/113/CE

* abrogée par la Directive Cadre Eau au plus tard en 2013

Boues

Nitrates

Eaux Souterraines

Eau potable

Baignade

Eaux superficielles

Poissons

Conchylicole

source : Mediterranean Wastewater Reuse Working Group, 2007

2. Recommandations / guides nationaux

En absence de réglementations nationales (ou européennes) ayant trait explicitement à la réutilisation des eaux usées, certains pays s'appuient sur des « recommandations » élaborées soit à partir des travaux américains, soit à partir des travaux de l'OMS. Ce chapitre résume ces deux démarches majeures.



Recommandations des Etats Unis

Aux Etats Unis, il existe des recommandations récentes élaborées en 2004 par l'US-EPA (United States – Environmental Protection Agency). Effectivement, cette agence s'est intéressée aux pratiques retenues par les Etats pour la réutilisation des eaux usées et, à partir de cette synthèse, a élaboré un guide (US-EPA, 2004). Les usages ont été également répertoriés ; les situations sont multiples et on retrouve tous les types d'usage mentionnés en introduction de ce rapport.

Chaque Etat ayant la possibilité de fixer ses propres recommandations, les situations peuvent être assez contrastées d'un Etat à l'autre. A titre d'exemple, le *Tableau II-2* illustre ces diversités pour un usage sans restriction c'est à dire un usage dans lequel le public est exposé : il correspond donc à l'exigence maximale de qualité.

Tableau II-2 : Exigences fixées par les Etats pour un usage sans restriction (US-EPA, 2004)

	Arizona	Californie	Floride	Hawaii	Nevada	Texas	Washington
Traitement	Traitement secondaire : filtration, désinfection	Oxydation, coagulation, filtration et désinfection	Traitement secondaire : filtration, haut niveau de désinfection	Oxydation, filtration et désinfection	Traitement secondaire : désinfection	NS	Oxydation, coagulation, filtration et désinfection
DBO₅	NS	NS	20 mg/L CDBO ₅ * ¹⁵	NS	30 mg/L	5 mg/L	30 mg/L
MES	NS	NS	5 mg/L	NS	NS		30 mg/L
Turbidité	2 NTU (moy)	2 NTU (moy)	NS	2 NTU (max)	NS	3 NTU	2 NTU (moy)
	5 NTU (max))	5 NTU (max))					5 NTU (max))
Coliformes	Fécaux	Totaux	Fécaux	Fécaux	Fécaux	Fécaux	Totaux
	ND (moy)	2.2/100 mL (moy)	75 % des éch. sous la limite de détection	2.2/100 mL (moy)	2.2/100 mL (moy)	20/100 mL (moy)	2.2/100 mL (moy)
	23/100 mL (max)	23/100 mL (max en 30j))	25/100 mL (max)	23/100 mL (max en 30j))	23/100 mL (max)	75/100 mL (max)	23/100 mL (max)

NS : Non Spécifié et ND : Non Détectable

¹⁵ *CBOD₅ = Carbonaceous BOD, ce qui signifie que seule est comptabilisée la consommation d'oxygène de la dégradation de la matière organique sans prendre en compte l'oxygène éventuellement nécessaire pour l'oxydation des composés azotés réduits (DBO réalisée en présence d'un inhibiteur, en général de l'allyl thio-urée), ce qui est la pratique habituelle en France.

Dans tous les Etats ayant une réglementation établie, une désinfection très poussée est donc exigée à l'exception du Texas où les exigences restent plus facilement accessibles. La déclinaison, initialement fixée dans l'Etat de Californie par « Unofficial California Code of Regulations (CCR), Title 22 » est connue sous le nom du "Titre 22" pour ses obligations de moyens drastiques.

A partir de la synthèse des pratiques retenues par les différents Etats, l'US-EPA propose des lignes directrices pour les différents usages (US-EPA, 2004).

En cas d'un usage agricole, on distingue 2 situations principales :

- cultures de produits non consommables ou ;
- cultures de produits consommables, une nouvelle distinction étant ajoutée entre les végétaux consommés cuits ou crus.

Le *tableau II-3* résume les 3 cas et renseigne l'exigence de qualité qui reste élevée, même pour des produits non consommables.

Tableau II-3 : Exigence de l'US-EPA pour l'irrigation de cultures

		Cultures de produits non consommables	Cultures de produits consommables	
			Cuits	Crus
Coliformes fécaux	médiane	200 U / 100 mL	200 U / 100 mL	Non détectable / 100 mL
	max	800 U / 100 mL	800 U / 100 mL	13U / 100 mL

Aux exigences mentionnées ci-dessus, s'ajoutent des conditions portant sur de nombreux paramètres physico-chimiques : DBO₅, turbidité, ... mais aussi d'ordre technique : distance, filière de désinfection, ... (US-EPA, 2004).



Recommandations de l'OMS

Les recommandations de l'OMS sont les seules existantes à l'échelle internationale. Elles sont sources d'inspiration pour de nombreux pays à travers le monde. Leur première apparition remonte à l'année 1989 avec l'ouvrage « L'utilisation des eaux usées en agriculture et aquaculture : recommandations à visées sanitaires ». Dès 2000, des demandes de révision apparaissent, basées sur des études épidémiologiques dont on suggère d'intégrer les résultats (Blumenthal *et al.*, 2000). La révision par l'OMS, basée une approche d'analyse quantitative de risques date de 2006.

➤ *Recommandations de 1989*

Des niveaux d'exigences sont fixés selon :

- les modes d'irrigation ;
- les risques pour le personnel ;
- et le type de cultures et l'usage.

En fonction de ces usages en agriculture ou en aquaculture, se déclinent trois niveaux de qualité (*tableau II-4*), dénommés A, B ou C, allant du plus contraignant vers le moins exigeant.

Tableau II-4 : 3 niveaux de qualité (OMS, 1989)

Niveau sanitaire	Œufs d'helminthes	Coliformes fécaux
A	< 1/L	10 ³ /100 mL si contact du public : 200/100 mL
B	< 1/L	Aucune contrainte
C	Aucune contrainte	Aucune contrainte

➤ *Etudes entre 1989 et 2006*

Des études épidémiologiques (*Blumenthal et al., 2000*) ont montré qu'il était très judicieux d'introduire une qualité bactériologique minimale pour protéger tant les travailleurs que les consommateurs. Cette qualité minimale est traduite par le paramètre coliformes fécaux, dont la quantité doit être inférieure à 10⁵ / 100 mL. Cette limite n'apparaissait pas dans les cas B et C des recommandations de 1989.

La limite de 1 œuf de nématodes par litre qui était proposée en 1989 ne convient pas dans des conditions favorables à leur survie c'est à dire en cas d'irrigation en surface sous des températures plus basses. Dans ces situations, il convient de réduire cette concentration à 0,1 œuf /L.

➤ *Recommandations de 2006*

Les nouvelles recommandations de 2006 de l'OMS font référence à la notion de DALY (Disability Adjusted Life Years ou années de vie corrigées de l'incapacité). La DALY peut être applicable à tout type de danger, qu'il soit d'ordre microbiologique, chimique ou radiologique. A l'origine appliqué à l'eau potable (*OMS, 2004*), l'OMS élargit son champ d'application et fait désormais largement appel à ce critère pour évaluer les priorités en santé publique et la charge en morbidité associée à des expositions environnementales.

Le principe de la DALY (*OMS, 2004*) est de pondérer chaque effet sanitaire en fonction de sa gravité par un coefficient allant de 0 (bon état de santé normal) à 1 (décès). Ce coefficient de pondération est multiplié par la durée de l'effet – à savoir le temps pendant lequel la maladie se manifeste (lorsque le résultat sanitaire est la mort du sujet, la « durée » est définie comme l'espérance de vie restante) – et par le nombre de personnes concernées par un résultat particulier. Il est ensuite possible d'additionner les effets de l'ensemble des divers résultats sanitaires provoqués par un agent donné.

Ainsi, la DALY (*OMS, 2004*) représente la somme des années de vie en bonne santé perdues du fait d'un décès prématuré (YLL) et des années de vie en bonne santé perdues contre des années de vie dans un état de santé détérioré, c'est à dire des années vécues en incapacité (YLD), normalisées par des coefficients de gravité d'où la formule : DALY = YLL + YLD. La DALY s'exprime donc en années pour une population donnée. Ce nombre s'exprime généralement en puissance de dix négative lorsqu'il est ramené à un individu.

Pour fixer des objectifs d'ordre sanitaire, l'existence d'un niveau de risque¹⁶ de référence (DALY= 10⁻⁶ années/personne et par an) permet de comparer entre elles les maladies véhiculées par l'eau et d'aborder de manière cohérente la gestion de chacun des dangers associés (*OMS, 2004*).

¹⁶ L'évaluation quantitative des risques microbiologiques (QMRA) est réalisée à partir de données et modèles pour l'instant, relativement limités mais dont les progrès sont à venir (*OMS, 2004*).

Ainsi, l'objectif sanitaire global, tel que mentionné ci-dessus peut englober l'eau traitée réutilisée. Si tel est le cas, l'OMS définit en 2006, pour le niveau de référence, des réductions à atteindre sur les pathogènes (exprimées en nombre d'unité log abattue) et une concentration en nombre d'œufs d'helminthe/L, en fonction du dispositif technique d'irrigation et du degré d'exposition des consommateurs et des ouvriers (*WHO et al., 2006*).

Les seuils proposés en 2000 apparaissent pourtant dans des conditions particulières ou en tant que seuil imposé :

- lorsque le personnel exposé concerne des enfants de moins de 15 ans, la qualité de l'eau usée doit contenir un maximum de 0,1 œufs d'helminthe / L, et ce, quel que soit le mode d'irrigation.
- Pour tous personnels, la concentration maximale en *E. coli* est systématiquement en dessous de 10^5 / 100 mL.

3. Et en France ...

La France ne dispose pas non plus de réglementation spécifique sur ce sujet.

La loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, dans son Art. 35, mentionnait une modification de l'article L.372 du code des communes et signale en section III de cet article : « *Les communes ou leurs groupements délimitent, après enquête publique : les zones d'assainissement collectif où elles sont tenues d'assurer la collecte des eaux usées domestiques et le stockage, l'épuration et le rejet ou la **réutilisation** de l'ensemble des eaux collectées* ».

La récente loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA, n°2006/1772 du 30 décembre 2006), qui abroge la précédente, ne fait plus référence de façon explicite à la réutilisation des eaux traitées.

L'arrêté du 22 juin 2007 relatif à « la collecte, au transport et au traitement des eaux usées des agglomérations d'assainissement ainsi qu'à la surveillance de leur fonctionnement et de leur efficacité, et aux dispositifs d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique supérieure à 1,2 kg/j de DBO₅ » est un des rares textes réglementaires à envisager la réutilisation des effluents traités. Effectivement, son article 10 relatif au rejet des effluents traités des stations de traitement des eaux usées précise que : "... *Dans le cas où le rejet des effluents traités dans les eaux superficielles n'est pas possible, les effluents traités peuvent être soit éliminés par infiltration dans le sol, si le sol est apte à ce mode d'élimination, soit réutilisés pour l'arrosage des espaces verts ou l'irrigation des cultures, conformément aux dispositions définies par arrêté du ministre chargé de la santé et du ministre chargé de l'environnement.*"

Le système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau mis en place par les agences de l'eau au début des années 2000 porte sur une analyse globale et cumulative de 15 types de dégradations possibles (*Ministère De L'écologie Et Du Développement Durable, Agences de l'eau, 2003*). L'une des altérations considérées est la présence de bactéries / micro-organismes dont on mesure l'impact par les paramètres suivants : Coliformes totaux, *E. coli* et streptocoques fécaux (tableau II-5). Ces paramètres étant communs pour partie à ceux utilisés dans le cadre de cette étude, leurs valeurs sont citées pour information et pour disposer de repères supplémentaires.

Tableau II-5 : Classes et indices de qualité de l'eau vis à vis de l'altération « Bactéries et micro-organismes » (Ministère De L'écologie Et Du Développement Durable, Agences de l'eau, 2003)

Classe d'aptitude	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Coliformes totaux (UFC / 100 mL)	50	500	5 000	10 000	
E. coli (UFC / 100 mL)	20	200	2 000	20 000	
Entérocoques ou streptocoques (UFC / 100 mL)	20	200	1 000	10 000	

Ces classes d'aptitude sont adaptées aux usages et résumées, pour certains usages dont l'irrigation et les loisirs et sports nautiques. Seule l'altération « micro-organismes » est reprise dans le *tableau II-6* ci-dessous mais d'autres altérations interviennent pour définir complètement ces aptitudes.

Tableau II-6 : Classes d'aptitude aux usages : irrigation, et les loisirs et sports nautiques vis à vis de l'altération « micro-organismes » (Ministère De L'écologie Et Du Développement Durable, Agences de l'eau, 2003).

Classe d'aptitude pour l'irrigation	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Coliformes totaux (UFC / 100 mL)	1 000		non décrit pour ces classes d'aptitude		
E Coli (UFC / 100 mL)	100		non décrit pour ces classes d'aptitude		
Classe d'aptitude pour les loisirs et sports nautiques	Bleu	Vert			
Coliformes totaux (UFC / 100 mL)	500	10 000			
E. coli (UFC / 100 mL)	100	2 000			
Entérocoques ou streptocoques (UFC / 100 mL)	100				non décrit pour ces classes d'aptitude

On notera une exigence plus forte pour l'usage « irrigation » que pour l'usage « loisirs », ce qui semble surprenant en première approche. L'exigence « irrigation » est très sévère, de 2 à 10 fois plus sévère que la catégorie A de l'OMS pour le paramètre E. coli. Il est fort probable que ces propositions de seuils puissent s'adapter à la pratique et la gestion de l'irrigation qui n'est pas spécifiée dans cette grille d'évaluation.



Propositions du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France

En France, la première tentative de réglementation de la réutilisation à des fins d'arrosage et d'irrigation remonte à la fin des années 80. Cette élaboration fut alors confiée au Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France (CSHPF) qui s'inspira très largement des instructions récentes de l'OMS (Lazarova et Brissaud, 2007).

Les premières recommandations proposées par le CSHPF sont publiées dans la circulaire DGS/SD1.D./91/51 du 22 juillet 1991 relative à « l'utilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation des cultures et l'arrosage des espaces verts ». Elle marque quelques différences avec le modèle proposé par l'OMS en 1989 : le risque lié aux aérosols, induisant des contraintes de distance et le risque lié à la présence de micropolluants métalliques.

Un complément à cette circulaire, clarifiant la notion de valeur impérative selon les paramètres, a été proposé en 1992 (Circulaire DGS/SD1.1D/92/42 du 3 août 1992). Le *tableau II-7* synthétise cette dernière circulaire. Cette circulaire propose que chaque demande nécessitant une eau de niveau A soit soumise à autorisation préfectorale.

Tableau II-7 : Recommandations françaises (d'après la circulaire DGS/SD1.1D/92/42)

	Niveau A	Niveau B		Niveau C
Irrigation	Irrigation avec technique limitant le mouillage des fruits et légumes	Irrigation par voie gravitaire ou à la raie	Irrigation par aspersion	Irrigation souterraine ou localisée
Cultures	Cultures consommées crues	Vergers, cultures céréalières et fourragères, pépinières, végétaux consommables après cuisson	Cultures, prairies de pâtures	Cultures de la catégorie B
Espaces verts	Oui, si irrigation hors période d'ouverture au public		Oui, si non ouverts au public	
Terrains de sport			Irrigation hors horaires ouverture au public + plusieurs semaines de latence après aspersion	
Contraintes	< 1 Œuf helminthe /L	< 1 Œuf helminthe /L		Pas de contrainte
	Coliformes fécaux < 1 000 / 100 mL	Pas de contrainte		Pas de contrainte
	100 m des habitations et zones recevant du public		100 m des habitations et zones recevant du public, écrans (arbres), protection du personnel	Epuration préalable pour considérations d'ordre technique (colmatage,...)

Le CSHPF s'est à nouveau penché sur le problème de la réutilisation des eaux entre les années 1999-2000 et il en résulte un projet d'arrêté en 2000. Il s'agit, globalement, d'une adaptation empirique conservant la logique des travaux de l'OMS de 1989. Comme précédemment, toutes les recommandations évoquées ne concernent que l'usage agricole (tableau II-8).

Tableau II-8 : Valeurs limites de la qualité des eaux réutilisées (Lazarova et Brissaud (2007))

Paramètres	Niveau de qualité			
	A	B	C*	D*
Type d'usage	Cultures maraîchères consommées crues ; Arbres fruitiers et pâturages irrigués par aspersion ; Espaces verts ouverts au public	Cultures maraîchères consommées après cuisson ; Céréales et fourrages ; Cultures florales, arbustes et pépinières avec aspersion	Cultures céréalières et fourragères ; Cultures florales, pépinières et arboriculture fruitière sans aspersion	Forêt d'exploitation avec accès contrôlé du public
MES, mg/L	35	35	35	35
Si lagunage naturel	≤ 150	≤ 150	≤ 150	≤ 150
DCO**, mg/L	125	≤ 125	≤ 125	≤ 125
E.coli/100 mL	≤ 1.000	≤ 1.000	≤ 10.000	-
Salmonelles/L	Absence	-	-	-
Œufs de ténia/L	Absence	-	-	-
Autres restrictions	Distance < 50 m des habitations, voies de circulation, conchyliculture et baignade et < 20 m des lacs et rivières	Distances de < 50 m à < 200 m en fonction de la nature des activités à protéger	Distances de < 100 m des lacs et rivières, < 200 m des baignades, < 300 m des lieux de conchyliculture	

*Ce niveau ne permet pas l'aspersion

**Dans le cas des lagunages, la DCO est réalisée sur effluent filtré

Dans ce projet et parmi les modifications les plus notables, on remarquera l'apparition d'un niveau de qualité supplémentaire (passage de 3 à 4 niveaux : le niveau D créé étant le moins contraignant correspond à l'actuel niveau C) et une modulation des « règles » de distance en fonction des milieux concernés et de la qualité de l'eau d'arrosage (*Lazarova et Brissaud, 2007*).

Le nouveau niveau de qualité le plus élevé (A), décline ainsi les niveaux de qualité existants. Ce niveau propose l'absence de salmonelles, censée garantir l'absence de microorganismes pathogènes et l'absence d'œuf de ténia dans un litre. Par ailleurs la distance entre les habitations et les zones arrosées irriguées a été ramenée à 50 mètres en cas de bonne qualité, ce qui, d'après les auteurs restent encore un frein à l'utilisation des eaux usées en espace urbain.

Cette proposition n'a pas eu les suites escomptées par les auteurs et la France ne dispose toujours de réglementation sur le sujet.

III. Traitement des eaux usées

L'usage d'eaux usées brutes est fortement déconseillé car vecteur d'un risque sanitaire potentiellement important pour l'homme et parce qu'il dégrade l'environnement. Pour limiter au mieux ces problèmes, les eaux usées sont envoyées dans des STEU qui sont un ensemble de dispositifs conçus pour extraire, au fur et à mesure, les différents polluants de ces eaux. L'assemblage de tous ces processus est aussi connu sous le nom de filière de traitement. Après avoir rappelé la constitution d'une eau usée urbaine standard, l'étude s'orientera vers les rendements qu'on peut espérer atteindre dans une station de traitement des eaux usées et plus particulièrement sur les paramètres devant satisfaire aux exigences de qualité d'un projet de réutilisation des eaux. L'entretien des ouvrages sera partiellement évoqué.

1. Composition d'une eau résiduaire urbaine

Un effluent urbain est défini comme un effluent issu des activités humaines d'une agglomération. Il est principalement composé d'eaux usées domestiques et, pour une faible part, d'eaux usées industrielles. Sa composition standard est donnée dans le *tableau III-1*.

Tableau III-1 : Composition d'une eau résiduaire urbaine « classique »

Paramètres	Signification	Valeur
pH	Potentiel Hydrogène	~ 8
Conductivité	Activité ionique du milieu	1 100 µS/cm
DCO	Demande Chimique en Oxygène ¹⁷	750 mg/L
DBO ₅	Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours ¹⁸	350 mg/L
MES	Matières En Suspension	300 mg/L
Lipides	Graisses	100 mg/L
NK	Azote Kjeldahl = azote organique + azote ammoniacal N-NH ₄ ⁺	80 mg/L
N-NH ₄ ⁺	Azote ammoniacal	60 mg/L
PT	Phosphore Total = phosphore organique + minéral	20 mg/L
P-PO ₄ ³⁻	Phosphore minéral (sous forme d'orthophosphates)	18 mg/L
Coliformes totaux	Microbiologie de l'eau usée	10 ⁹ UFC / 100 mL
Coliformes fécaux		10 ⁸ UFC / 100 mL
Kystes et oocystes de protozoaires		10 ⁵ kystes/L
Œufs d'helminthes		10 ⁴ Œufs/L
Virus		10 ⁵ UFP/L

source : extrait et adapté de documents techniques FNDAE (Canler, 2001 ; Canler et Perret, 2004, 2007) pour les données physico-chimiques et d'Asano et al. (2007) pour les données microbiologiques

¹⁷ Permet la mesure globale des matières organiques, plus ou moins biodégradables et réfractaires.

¹⁸ Définit la concentration en matières organiques dégradables de l'eau pour une durée déterminée. Elle correspond à la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes vivants pour assurer l'oxydation et la stabilisation des matières organiques présentes dans l'eau usée. Par convention, la DBO₅ est la valeur de DBO obtenue après 5 jours d'incubation.

Les valeurs indiquées dans le *tableau III-1* seront conservées pour la suite de ce rapport lorsque sera abordé la question du rendement des différents ouvrages sur les paramètres cités et donc la concentration attendue en aval du traitement.

Une STEU « classique » est composée d'équipements de prétraitements, d'un traitement primaire (facultatif), suivi par un traitement secondaire. Lors d'un rejet dans le milieu naturel, cette simple organisation peut suffire mais dans les projets de réutilisation des eaux usées traitées, un traitement tertiaire est parfois nécessaire et ce traitement concerne éventuellement une étape supplémentaire, dite de désinfection. Le développement qui suit va reprendre les efficacités attendues à chaque stade de traitement pour les différents ouvrages associés.

2. Technologies de traitement des eaux usées en REUT



Prétraitement et traitement primaire

Il n'a pas été jugé pertinent d'intégrer ces étapes de traitement dans le rapport mais elles sont sensiblement plus détaillées dans l'*ANNEXE H*.

Il n'est pas inutile de rappeler que ces ouvrages n'ont pas pour vocation de traiter efficacement la microbiologie et les micropolluants des eaux et que, par conséquent, leurs rendements respectifs sur ces paramètres seraient plutôt anecdotiques.

Une fois l'eau usée brute débarrassée des matériaux « grossiers » (déchets, sables, graisses, matières en suspension de grande taille, ...) et d'une partie de sa pollution carbonée, on obtient, en sortie du traitement primaire, un effluent dit effluent primaire. La prochaine étape de traitement va permettre d'abattre efficacement les pollutions carbonée, azotée et phosphorée contenues dans les eaux : il s'agit du traitement secondaire.



Traitement secondaire

Les procédés rencontrés à ce stade de l'épuration mettent en jeu des bactéries qui vont dégrader la pollution organique (traitement biologique). Parmi les traitements biologiques principalement rencontrés, on peut citer les procédés à boues activées (BA), les lits bactériens (LB), les biofiltres (BF), le lagunage naturel (LN) puis les bioréacteurs à membranes (BAM). Le *tableau III-2* reprend quelques unes de leurs caractéristiques, notamment leur entretien et les besoins énergétiques.

Tableau III-2 : Techniques les plus répandues en traitement secondaire

	BA	LB	BF	LN	BAM
Principe ^a	Dégradation des pollutions carbonée, azotée et phosphorée par des bactéries dans un réacteur	- Culture de bactéries sur un substrat inerte - Répartition de l'effluent sur le « lit »	- Culture de bactéries sur un substrat - Filtration de l'effluent (pression)	- Equilibre bactéries/algues - Souvent 3 bassins - Abattement N, P et réduction microorganismes	Couplage procédé biologique et technique membranaire immergée ou externe (filtration)
Nature du procédé	Intensif à cultures libres	Intensif à cultures fixées	Intensif à cultures fixées	Extensif à cultures libres	Intensif à cultures libres
Besoin énergétique (kWh/m ³) ^b	Oui (élevé : 0,5 à 1)	Oui	Oui	Non	Oui (faible si membranes immergées : 0,2 à 0,4 ; moyen si membranes externes : 0,4 à 0,6)
Capacité conseillée (EH)	A partir de 400	Généralement > 300	Plutôt pour des moyennes et grandes collectivités (> 5 000)	200 à 2 000	800 à 200 000 ^c
Entretien	- Organes de régulation (2 fois/an) -inspection générale (1 fois/semaine) - Recirculation boues (1 à 2 fois/semaine) - Entretien régulier (hebdomadaire) par une personne formée	- Inspection (2 fois/semaine) - Organes de régulation (2 fois/an) - Recirculation eaux (2 fois/semaine) - Débouchage des trous du sprinkler	- Extraction boues (1 fois/13 ans) - Faucardage (2 à 5 fois/an) - Curage cône de la lagune laire (1 fois/an) - Facilité d'exploitation		- Lavage chimique périodique de la membrane (décolmatage) - Inspection générale du système à faire régulièrement
Source	Alexandre et al. 1997 (FNDAE n°22)	Alexandre et al. 1997 (FNDAE n°22)		Alexandre et al. 1997 (FNDAE n°22)	Racault, 2004

(a) extrait du document technique FNDAE n°22

(b) extrait de Lazarova et Brissaud, 2007

(c) Racault, 2004, citation : « En Europe, les installations concernent des agglomérations allant de 800 EH à plus de 200 000 EH »

➤ *Efficacité des ouvrages*

La même logique de présentation que précédemment est reprise (*tableau III-3*). On notera quelques lacunes bibliographiques au niveau de l'abattement des micropolluants minéraux en REUT. Les concentrations indiquées en microbiologie sont pour des volumes de 100 mL.

Tableau III-3 : Efficacité « attendue » du traitement secondaire

	Concentration (ou rendement) attendue en sortie d'ouvrage				
	BA ^a	LB ^b	BF ^c	LN ^d	BAM ^e
DBO₅	15 mg/L	< 35 mg/L	< 35 mg/L	Non pertinent	< 5 mg/L
DCO	60 mg/L	< 125 mg/L	< 125 mg/L	< 125 mg/L	< 30 mg/L
MES	15 mg/L	< 30 mg/L	< 30 mg/L	< 150 mg/L	< 2 mg/L
N-NH₄⁺	Variable			60 à 70 % sur NT	< 5 mg/L
N-NO₃⁻	Variable				< 10 mg/L
PT	Variable			60 à 70 % sur PT	< 5 mg/L
Coliformes totaux	10 ⁴ -10 ⁵	Elimination jusqu'à 2 log		Elimination jusqu'à 6 log	< 100
Kystes de protozoaires	10 ¹ -10 ² 0-10 ^f			0	< 1
Œuf d'helminthes		Elimination jusqu'à 0.6 log ^g		0	< 1
Virus	10 ¹ -10 ³	Elimination jusqu'à 0.8 log ^g		Elimination jusqu'à 4 log	1 – 10 ³
Micropolluants minéraux (en % d'élimination)					
Argent	7				
Arsenic	83				
Cadmium	28			45-100	
Chrome	55	5		0-45	
Cuivre	70	19		30-90	
Fer	65	56		0-80	
Manganèse	58	40		25	
Mercure	30	16		70	
Plomb	60	46		9-100	
Selenium	13	0			
Zinc	75	55		40-100	
Source	US-EPA (1992)			Shilton (2005)	

(a) : extrait du document FNDAE n°22 pour DBO, DCO, MES, N, P ; extrait de Asano *et al.* (2007) pour la microbiologie

(b) : extrait du document FNDAE n°22 pour DBO, DCO, MES, N, P ; extrait de US-EPA (1992) pour la microbiologie

(c) : extrait du document FNDAE n°22 pour DBO, DCO, MES, N, P

(d) : extrait du document FNDAE n°22 pour DBO, DCO, MES, N, P ; extrait de Asano (1998) pour la microbiologie

(e) : extrait de Asano *et al.* (2007)

(f) : si ouvrage conçu pour l'élimination biologique de l'azote et du phosphore

(g) : 0.6 log = 75 % ; 0.8 log = 85 %

Les techniques « boues activées » et « bioréacteur à membranes » semblent offrir les meilleures performances épuratoires sur les pollutions azotée, carbonée et phosphorée. D'un point de vue microbiologique, c'est le lagunage naturel et le bioréacteur à membranes qui semblent être les plus efficaces. Le *tableau III-4* rappelle brièvement quelques uns des avantages et inconvénients de ces techniques.

Tableau III-4 : Avantages et inconvénients des boues activées, d'un lagunage naturel et d'un BAM

	Avantages	Inconvénients	Source
BA	- Adapté aux variations de charge - Bonnes performances de traitement	- Exploitation rigoureuse nécessaire - Coûts d'investissement et fonctionnement élevés	<i>CG29-DEE-SATEA, 2008</i>
LN	- Pas de besoin énergétique - Désinfection correcte - Bonne intégration environnementale	- Emprise foncière importante - Qualité de l'effluent très dépendante de l'environnement (climat, ...)	<i>CG29-DEE-SATEA, 2008</i>
BAM	- Réduction du nombre d'ouvrages - Faible production de boues en excès - Elimination des pathogènes	- Importante dépense énergétique - Coût élevé des membranes - Faible durée de vie	<i>Racault, 2004</i>

➤ *Autres filières existantes*

Avant d'aborder le traitement tertiaire, le *tableau III-5* rappelle les principales caractéristiques des autres techniques de traitement secondaire de type biologique. On distingue les disques biologiques (DB), le lagunage aéré (LA), le lit d'infiltration-percolation (IP) et les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (FPR_V) et horizontal (FPR_H).

Tableau III-5 : Autres techniques en traitement secondaire

	DB	LA	IP	FPR_V	FPR_H
Principe	- Ensemble de disques, réalisés en matériau composite, montés et assemblés sur un arbre - En partie immergé dans l'effluent à traiter grâce à un mouvement rotatif - Biofilm épurateur à la surface du disque	- Un étage d'aération, assurée par un agitateur de surface - Un étage de décantation	- Filtration biologique aérobie sur milieu granulaire - Répartition de l'effluent sur toute la surface - Possibilité d'élimination des microorganismes pathogènes en fonction de l'épaisseur du massif filtrant	- Couches successives de gravier ou de sable de granulométrie variable - L'influent brut est réparti directement à la surface du filtre - Traitement physique (filtration), chimique (adsorption, précipitation...) et biologique (biomasse fixée)	- Massif filtrant totalement saturé - L'effluent est réparti sur toute la largeur et la hauteur du lit - Traitement physique (filtration), chimique (adsorption, précipitation...) et biologique (biomasse fixée) en processus de dégradation anoxique (O₂ limitant) - Possibilité d'élimination des microorganismes pathogènes en fonction de Temps de Rétention Hydraulique
Besoin énergétique	Oui	Oui	Non	Non	Non
Capacité conseillée	300 à 2 800 EH	400 à 2 000 EH	200 à 1 200 EH	50 à 1 000 EH ^a	
Source	<i>Alexandre et al., 1997 (FNDAE n°22)</i>			<i>Berland et al., 2001</i>	

(a) : extrait de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 2007.



Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire regroupe un ensemble de techniques destinées à réduire la concentration de très nombreux paramètres. Pour atteindre un objectif de REUT, on distingue 3 étapes principales, qui, selon les objectifs et techniques retenus, peuvent ou non être effectuées de façon simultanée : la rétention des matières en suspension et colloïdales résiduelles, la réduction d'autres paramètres chimiques (N, P, ...) et la désinfection.

➤ Filtration des matières en suspension

En ce qui concerne la rétention des MES, le procédé le plus connu est le filtre sur milieu granulaire (sable, anthracite...) mais d'autres techniques de filtration sont de plus en plus banalisées. Parmi ces procédés, on distingue la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) ou l'osmose inverse (OI) (*tableau III-6*).

Tableau III-6 : Techniques de filtration en traitement tertiaire

	<i>MF</i>	<i>UF</i>	<i>NF</i>	<i>OI</i>	<i>Filtre sur milieu granulaire^(a)</i>
Matériau le plus utilisé	Polysulfoné	Polysulfoné	Polyamide	Polyamide	Sable, Anthracite
Diamètre de pores (µm)	0.04 - 10	0.003 – 0.2	0.001 – 0.003	< 0.0005	> 0.2
Seuil de coupure en poids moléculaire (Dalton¹⁹)	100 000 - 500 000	3 000 – 100 000	200 – 10 000	< 200	2-3 µm
Barrière efficace contre	<i>Cf. figure III-1</i>				
Pression de travail (kPa)	35 – 350	175 – 1 000	1 000 – 3 100	1 400 – 10 000 (3 100 en réutilisation contre 10 000 en dessalement)	7 - 14
Configuration la plus répandue	Fibres creuses (immergées)	Fibres creuses et module spiralé	Module spiralé	Module spiralé	Multicouches (double)
<i>Source 1 : De Koning et al., 2006 ; 2008</i>					
Prétraitement(s)	Non	Eventuel	Oui	Oui	Non
Posttraitement(s)	Non	Non	Eventuel (reminéralisation)	Oui (reminéralisation)	Non
Avantages	- Peut réduire l'utilisation des produits chimiques - Peu encombrant - Peut être facilement automatisé - Peut travailler à basse pression - Retient une partie des microorganismes				- Procédé compact - Nécessite peu d'énergie - Mise en œuvre rapide - Automatisation simple - Sécurité par rapport au milieu récepteur
Inconvénients	- Gourmand en énergie - Prétraitement éventuel - Remplacement des membranes tous les 5 ans - Risque d'incrustation - Diminution progressive du débit membranaire - Equipements coûteux				- Efficacité limitée vis-à-vis de la bactériologie - Investissement élevé - Nécessité de lavage - Devenir du sable ?
<i>Sources 2 : Asano et al., 2007 ; CG29-DEE-SATEA (1998) pour avantages et inconvénients</i>					

¹⁹ D'après l'encyclopédie Universalis, le Dalton est une unité de masse ; 1 Dalton = masse d'un atome d'H = $1,67 \times 10^{-24}$ g.

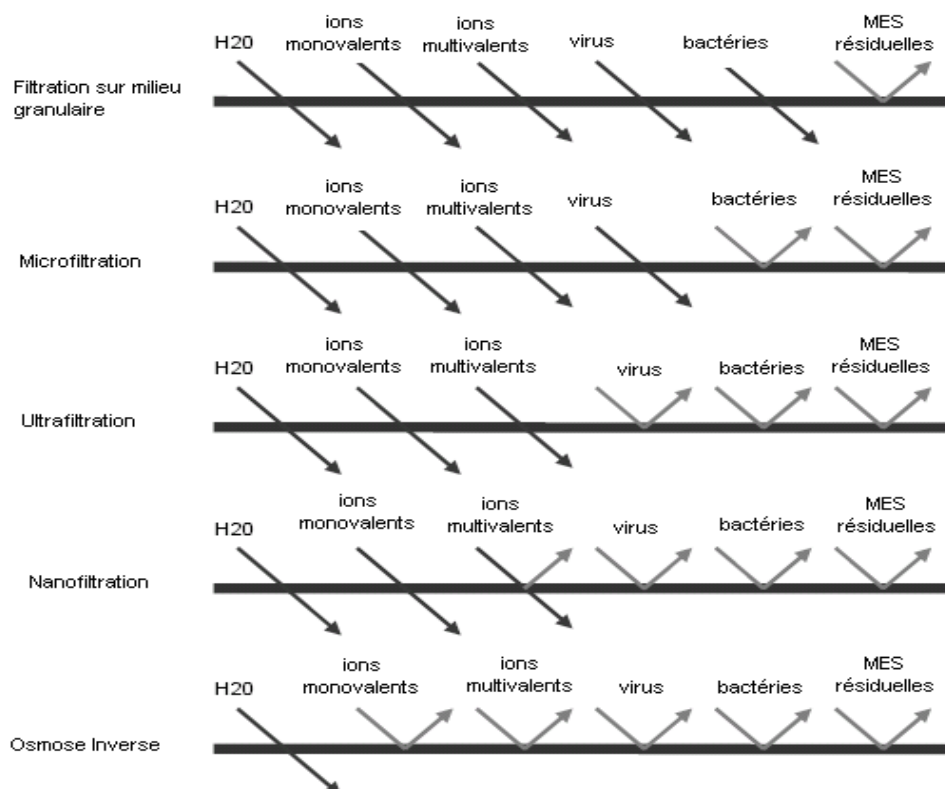


Figure III-1 : Constituants retenus suivant chaque technique membranaire

Bien que les techniques membranaires soient particulièrement efficaces pour éliminer les constituants résiduels des eaux usées, il convient d'être attentif sur certains points et tout particulièrement sur la nature de l'effluent à filtrer. Une eau chargée risquerait de colmater irrémédiablement les membranes et entraînerait des dysfonctionnements importants.

Le colmatage est certainement le phénomène le plus contraignant dans les utilisations membranaires puisqu'il implique une diminution progressive du débit de filtration au cours du temps et réduit la durée de vie des membranes. Il existe, tout de même, des techniques pour le limiter mais celles-ci font souvent appel à des traitements chimiques spécifiques en fonction de la nature de la membrane et les opérations et coûts de maintenance sont encore trop élevés pour permettre une utilisation de ces techniques à grande échelle. De plus, le traitement du concentrat²⁰ pose parfois quelques problèmes car il est peu respectueux de l'environnement.

➤ Réduction d'autres paramètres chimiques

Parmi les autres techniques rencontrées en traitement tertiaire, on peut citer la coagulation - floculation chimique ainsi que le lagunage tertiaire. Le cas de la coagulation-floculation a déjà été abordé dans ce rapport (*ANNEXE H*) et ne sera donc pas repris ici.

Le traitement par lagunage tertiaire comprend plusieurs lagunes, dites de maturation, qui permettent d'assurer la désinfection de l'eau. Ces lagunes sont de faibles profondeurs (de 0,8 à 1,2 m) pour permettre une pénétration totale des rayonnements UV naturels et réaliser ainsi la désinfection.

²⁰ D'après le site www.dictionnaire-environnement.com, le concentrat désigne un fluide enrichi en substances arrêtées par la membrane.

Il faut noter qu'en lagunage tertiaire, en plus de la profondeur et du fractionnement des ouvrages, la durée de temps de séjour (notée DTS) joue un rôle fondamental dans l'élimination des microorganismes. Le tableau III-7 présente quelques avantages et inconvénients de cette technique.

Tableau III-7 : Avantages et inconvénients du lagunage tertiaire

Avantages	Inconvénients
- Sécurité par rapport au milieu récepteur - Efficacité de la désinfection correcte mais dépendante du temps de séjour - Pas de formation de sous-produits nocifs - Pas de besoin énergétique - Bonne intégration environnementale	- Risque de dégradation de la qualité physico-chimique et bactériologique du rejet lié à la formation d'algues et de végétaux flottants - Investissement important - Efficacité de la désinfection dépendante de plusieurs facteurs (ensoleillement, fientes d'oiseaux, ...) - Emprise foncière importante - Exploitation pouvant être contraignante (lentilles d'eau, ...)

source : CG29-DEE-SATEA, 2008

D'autres techniques peuvent s'avérer très efficaces en traitement tertiaire suivant la nature du constituant qu'on cherche à éliminer. Parmi les procédés identifiés, on distingue l'échange d'ion, le charbon actif en grains (CAG) et en poudre (CAP), ainsi que l'électrodialyse. Le tableau III-8 reprend brièvement l'intérêt de chacune de ces techniques.

Tableau III-8 : Autres techniques en traitement tertiaire (Asano et al., 2007)

	Echange d'ions	CAG	CAP	Electrodialyse
Principe	- L'effluent à traiter passe sur une résine où vont interagir les constituants de la résine avec certains de l'eau - Différents types de résines suivant la nature du composé que l'on souhaite échanger (cationique, anionique)	- Produit par pyrolyse de bouts de bois, coques de noix de coco, ... - Structure microporeuse en surface qui peut « capturer » des molécules de très fines tailles - Le CAG a une surface spécifique comprise entre 700 et 1 300 m²/g de charbon alors que le CAP a une surface spécifique comprise entre 800 et 1 800 m²/g de charbon		- Séparation électrochimique où les ions sont transportés à travers des membranes sélectives sous l'influence d'un courant électrique - Peut être soit directe (ED), soit inversée (EDR) où simplement les polarités sont inversées
Intérêt	- Peut éliminer les ions ammonium, les nitrates, les micropolluants métalliques, les solides dissous et les matières organiques	- Destiné à éliminer efficacement les éléments traces organiques (solvants, pesticides, hydrocarbures, ...) et les éléments traces minéraux comme les micropolluants métalliques - Le CAP, de diamètre inférieur à 0.074 mm, est surtout employé dans les procédés à boues activées - Le CAG, de diamètre supérieur à 0.1 mm, est plutôt utilisé dans les procédés de filtration		- Permet d'éliminer les ions, mais pas aussi efficacement que l'osmose inverse - Permet d'éliminer les solides dissous en grande quantité (dans le cas de l'EDR, peut traiter des eaux contenant 10 000 à 12 000 mg/L de solides dissous totaux)

A titre purement informatif, on peut citer d'autres techniques qui peuvent être prises en considération en réutilisation des eaux. Il existe les procédés de distillation (Asano et al., 2007) qui permettent d'éliminer une partie des sels contenus, les ultrasons qui permettent d'éliminer les composés organiques volatils et non volatils ou encore le Fenton qui permet d'éliminer de nombreux composés organiques dangereux par réaction entre le peroxyde d'hydrogène H₂O₂ et le Fer (source : De Koning et al., 2006 ; 2008).

L'efficacité attendue des filières mentionnées est présentée selon le même principe que dans les tableaux précédents. Les valeurs présentées dans le tableau III-9 sont des rendements, sauf précision d'une autre unité. Les valeurs indiquées concernent des efficacités sur un effluent secondaire (i.e., après traitement secondaire). On parlera également de l'efficacité des lits d'infiltration-percolation (cf. remarque dans le tableau III-5).

Tableau III-9 : Efficacité « attendue » du traitement tertiaire (en % ou u.log)

	MF	UF	NF	OI	Filtration sur milieu granulaire	Lagunage	Infiltration-percolation
DBO	75 - 90	80 - 90	COT :	COT :			60 - 100
DCO	70 - 85	75 - 90	90 - 98	90 - 98			30 - 50
MES	95 - 98	96 - 99.9	40 - 60	90 - 98	1 à 8 mg/L ^b		65 - 95
N-NH₄⁺	5- 15	5 - 15					65 - 60
N-NO₃⁻	0 - 2	0 - 2	10 - 30	84 - 96			-
PO₄³⁻	0 - 2	0 - 2	retenu ^a	retenu ^a			20
NaCl			10 - 50	90 - 99			
NaSO₄			80 - 95	90 - 99			60 - 100
CaCl₂			10 - 50	90 - 99			
MgSO₄			80 - 95	95 - 99			
Coliformes fécaux	2 - 5 u.log	3 - 6 u.log	3 - 5 u.log	4 - 7 u.log	vitesse rapide : 0.3 - 0.7 u.log ^c vitesse lente : 2 - 3 log ^c	DTS court : 1-3 u.log ^d DTS long : 2-4 u.log ^d	2 - 4 u.log selon la charge hydraulique
Protozoaires	2 - 5 u.log	> 6 u.log	> 6 u.log	4 - 7 u.log	0 - 3 u.log		
Virus	0 - 2 u.log	2 - 7 u.log	3 - 5 u.log	4 - 7 u.log	0 - 1 u.log	1 - 3 u.log	1,5 - 2,5 u.log

(a) : extrait de Seira, 2008 - (b) : extrait de Asano *et al.*, 2007- (c) : extrait de CG29-DEE-SATEA, 2008 ; vitesse rapide : 10-12 m/h ; vitesse lente : charge hydraulique de 0.2 à 0.6 m/j - (d) : extrait de CG29-DEE-SATEA, 2008 ; DTS court : 30-40 jours ; DTS long : 60-80 jours - (e) : extrait de De Koning *et al.*, 2008

Le *tableau III-9* présente l'intérêt de regrouper les données pour les diverses techniques disponibles. Pourtant, pour un même procédé, les abattements sont très variables, tout particulièrement vis à vis des pathogènes. Il serait nécessaire de disposer de données de dimensionnement et/ou de fonctionnement plus précises pour que cette comparaison devienne pertinente.

Bien que les techniques membranaires soient théoriquement efficaces pour retenir les pollutions dissoutes et notamment les microorganismes, elles n'offrent aucune garantie sur une éventuelle recontamination à l'aval. Il est bien souvent nécessaire d'ajouter des produits chimiques pour garantir une eau microbiologiquement apte à la réutilisation : il s'agit de l'étape de désinfection.

Faby (1997) précise que les projets de réutilisation des eaux comportent bien souvent des ouvrages de stockage et que, suivant la durée du stockage, une efficacité sur les microorganismes peut être observée. Ces bassins de stockage, dits réservoirs de stabilisation, peuvent constituer un véritable traitement complémentaire.

➤ Désinfection

La prise de conscience d'un danger microbien pour la santé humaine remonte aux travaux de Pasteur au XIX^{ème} siècle. Depuis, les techniques de désinfection ont bien évolué et elles sont aujourd'hui très répandues en REUT. Parmi ces technologies, on distingue la désinfection chimique : la chloration (à l'eau de Javel, au chlore gazeux, au bioxyde de chlore, aux chloramines), l'acide péricétique, l'ozonation, de la désinfection physique : le rayonnement UV.

Ces techniques sont présentées dans le tableau III-10 (les avantages et inconvénients abordés restent très généraux) et quelques unes des caractéristiques des produits ou moyens employés sont résumés dans le tableau III-11.

Tableau III-10 : Techniques de désinfection les plus répandues

	UV	Ozone	Chloration			Acide péacétique
			Chlore gazeux	Bioxyde de chlore	Eau de Javel	
Formule chimique	$\lambda = 254 \text{ nm}$	O_3	Cl_2	ClO_2	$NaClO$	$CH_3-COOOH$
Etat	Radiation électro-magnétique	Gazeux	Gazeux	Gazeux	Liquide	Liquide
Principe	Agit directement sur l'ADN des microorganismes et interrompt leur processus de vie et de reproduction	- Décharge électrique dans l'oxygène entre deux électrodes - Production d'un radical détruisant les micro-organismes	Puissant désinfectant qui inhibe les fonctions enzymatiques des bactéries			Eau oxygénée activée altérant les génomes bactériens et viraux
Réactions		$O_3 + H_2O \rightleftharpoons HO\cdot + HO_2$	$Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HClO + HCl$	Plusieurs voies possibles	$2 NaOH + Cl_2 \rightleftharpoons NaClO + H_2O$	$CH_3COOH + H_2O_2 \rightleftharpoons CH_3COOOH + H_2O$
Avantages	- Pas de sous-produits - Facilité d'utilisation et sécurité d'exploitation	- Spectre d'action large - Très efficace contre les virus - Pas de formation de THM	- Présence d'un résiduel qui garantit la désinfection - Grande facilité d'utilisation	- Grande efficacité contre les pathogènes - Plus efficace que le Cl_2 - Ne réagit pas avec la matière organique		- Large spectre d'action - Absence de résidus mutagènes - Coût d'installation peu élevé
Inconvénients	- Pas de résiduel (risque de recontamination sur le réseau si casse) - Sensible aux variations de turbidité	- Très instable (généralisé in situ) - Pas de résiduel - Grande consommation d'énergie - Coûts d'investissement importants	- Reviviscence bactérienne possible (formes de résistances) - Gaz corrosif - Présence possible de sous-produits indésirables (THM, ...), responsables de mauvaise odeur et goût	- Instable (généralisé sur place) - Peut générer des chlorites ClO_2^- - Assez cher	- Présence possible de sous-produits indésirables (THM, ...), responsables de mauvaise odeur et goût - Peut provoquer précipitation du calcium - Solution se dégradant dans le temps	- Augmentation des composés organiques - Régulé par certains facteurs (pH, ...) - Très cher
Effet rémanent	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Inconnu
Source	Berland et Juery, 2002 ; FNDAA n°14, Juery, 2004, FNDAA n°2					Kitis, 2004

Tableau III-11 : Quelques caractéristiques des procédés de désinfection

Caractéristiques	Cl ₂	Eau Javel ^a	Chloramines	ClO ₂	O ₃	UV
Capacité à désodoriser	Haute	Modérée	Modérée	Haute	Haute	na ^b
Interaction avec la matière organique	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Absorption de la radiation
Corrosif	Très	Corrosif	Corrosif	Très	Très	na
Toxique pour hommes et animaux	Très	Très	Toxique	Toxique	Toxique	Toxique
Pénétration dans les particules	Haute	Haute	Modérée	Haute	Haute	Modérée
Risque de recontamination en aval	Faible	Moyen à élevé	Faible à moyen	Faible	Modéré	Elevé
Solubilité	Modérée	Elevée	Elevée	Elevée	Elevée	na
Stabilité	Stable	Relativement instable	Relativement instable	Instable	Instable	na
Efficacité sur						
Bactéries	Excellente	Excellente	Bonne	Excellente	Excellente	Bonne
Protozoaires	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Faible	Bonne	Bonne	Excellente
Virus	Excellent	Excellente	Moyenne	Excellente	Excellente	Bonne
Formation de sous-produits	THM et HAA	THM et HAA	THM, HAA ^c , chlorure de cyanogène, NDMA ^d	Chlorite et Chlorates	Bromate	Apparemment pas
Augmentation de la concentration en solides totaux dissous (TDS)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Utilisation comme désinfectant	Commune (remise en cause)	Commune	Commune	Occasionnelle	Occasionnelle	De plus en plus

(a) : HClO et ClO⁻ ; (b) : na = non applicable ; (c) : Acides acétiques halogénés ; (d) : N-nitrosodiméthylamine

Source : Asano et al. (2007)

Le tableau III-12 reprend l'efficacité des différents procédés de désinfection exprimée sous forme chiffrée. Pour l'évaluer, on considère bien souvent le concept de concentration résiduelle en désinfectant (mg/L) multipliée par le temps de contact (min), noté C_{Rt} (exprimée en mg.min/L). Cette notion n'est cependant pas valable pour le rayonnement UV.

Les valeurs indiquées ci-dessous sont uniquement indicatrices et non prises comme références ; Asano et al. (2007) précisent que les expériences ont été réalisées en laboratoire sur des effluents synthétiques qui n'avaient pas nécessairement la même composition que les eaux usées. De plus, ces valeurs dépendent de la température, du pH et l'efficacité peut être variable sur des microorganismes au sein d'une même famille. Ceci justifie donc le poids relatif qu'on peut attribuer à ces données.

Tableau III-12 : C_{RT} typiques pour plusieurs niveaux d'inactivation de microorganismes

		Inactivation			
Désinfectant	Unité	1-Log	2-Log	3-Log	4-Log
Bactéries					
Chlore libre	mg.min/L	0.1 – 0.2	0.4 – 0.6	3 – 4	8 – 10
Chloramines	mg.min/L	4 – 6	10 – 12	20 – 40	70 – 90
ClO ₂	mg.min/L	2 – 4	8 - 10	20 – 30	50 – 70
O ₃	mg.min/L		3 – 4		
Radiation UV	mJ/cm ²		30 - 60	60 - 80	80 - 100
Virus					
Chlore libre	mg.min/L		1 - 4	8 - 16	20 – 40
Chloramines	mg.min/L		600 - 700	900 – 1 100	1 400 – 1 600
ClO ₂	mg.min/L		4 - 6	10 - 14	20 – 30
O ₃	mg.min/L		0.4 – 0.6	0.7 – 0.9	0.9 – 1.0
Radiation UV	mJ/cm ²		30 - 40	50 - 70	70 – 90
Protozoaires					
Chlore libre	mg.min/L	30 - 40	60 - 70	90 – 110	
Chloramines	mg.min/L	600 - 650	1 200 – 1 400	1 800 – 2 000	
ClO ₂	mg.min/L	7 – 9	14 - 16	20 - 25	
O ₃	mg.min/L	0.4 – 0.6	0.9 – 1.2	1.4 – 1.6	
Radiation UV	mJ/cm ²	5 - 10	10 - 20	20 - 30	

Parmi les chiffres avancés, l'ozone semble être le désinfectant le plus efficace à de « faibles » concentrations, notamment vis-à-vis des virus. En revanche, les chloramines imposent des concentrations particulièrement élevées pour être efficaces au même titre que l'ozone par exemple. Suite à ce constat, l'emploi de l'ozone dans les étapes de désinfection pourrait se développer. Néanmoins, il faudrait étudier plus amplement sur les avantages, les inconvénients, les effets sur l'environnement, la nature des sous-produits formés et leur impact, les questions de coûts engagés et les facilités de mises en place du procédé pour sélectionner le produit le plus approprié.

N'étant pas, à proprement parler, des procédés de désinfection, les Procédés d'Oxydation Avancée (AOP) peuvent tout de même s'avérer efficaces contre la flore bactérienne des eaux usées. Une autre expérience, un peu plus insolite et citée pour mémoire, repose sur l'épuration microbiologique par des cultures (de plantes) dans l'eau. Ces « technologies » sont présentées dans le *tableau III-13*.

Tableau III-13 : Autres « techniques » possibles en désinfection

	Procédés d'oxydation avancée (AOP)					Culture hydroponique
	H ₂ O ₂ /UV	H ₂ O ₂ /O ₃	O ₃ /UV	O ₃ /UV/H ₂ O ₂	TiO ₂ /UV	
Principe	- Utilisés pour éliminer les éléments traces qui ne peuvent pas être oxydés par des oxydants « conventionnels » - Repose essentiellement sur la formation de radicaux hydroxyles OH[•] - Souvent employés lors d'une demande en eau de qualité irréprochable					Consiste à faire pousser des plantes dans de l'eau et non sur la terre ; cette technique est aussi connue sous le nom de culture hors sol
Intérêt	- Efficace contre les microorganismes - Le couplage des techniques permet bien souvent d'être plus efficace contre les microorganismes que chaque technique prise séparément - Le couplage des techniques permet, dans certaines conditions, de réduire l'utilisation de produits chimiques et par conséquent, les coûts (diminution pouvant également être observée sur les besoins en énergie) - Chaque technique dispose d'avantages et d'inconvénients à prendre en compte (stabilité des réactifs, dépenses énergétiques plus ou moins importantes suivant le couplage, ...)					- Elimination satisfaisante des microorganismes et pourrait être une alternative aux traitements des eaux usées - « Adaptée » aux petites populations car temps de séjour élevé (environ 13 jours)
Source	Asano et al., 2007					Ottoson et al., 2005

D'autres exemples d'AOP ont été abordés dans le document de synthèse du projet européen AQUAREC (*De Koning et al., 2006*) en tant que techniques émergentes et sans indications supplémentaires : il s'agit de la technique à plasma pulsé, l'électrolyse, l'ozonation catalytique et les radiations ionisantes. On peut toutefois supposer que leurs effets sont les mêmes que ceux des techniques présentées dans le *tableau III-13*.

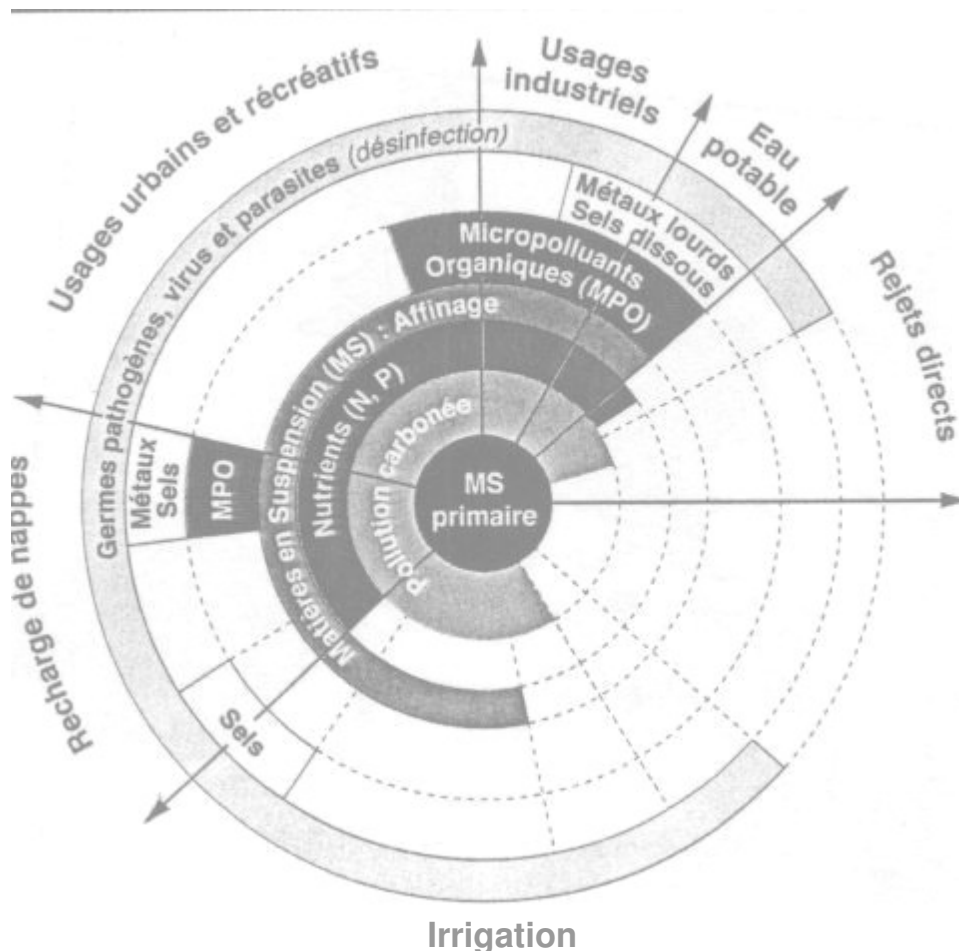
IV. Quelle(s) filière(s) de traitement pour quel usage ?

Les exigences de qualité liées à chaque usage ne sont pas les mêmes. D'une manière générale, les usages non potables peuvent impliquer des traitements peu contraignants, alors que les usages potables requièrent des traitements très poussés : plusieurs niveaux d'épuration sont alors mis en jeu.

Après avoir exposé les différents niveaux de traitement nécessaires pour chaque utilisation d'eau en REUT, l'étude s'orientera vers les filières de traitement en regard de l'usage souhaité et donc de la qualité requise. Plusieurs modèles seront alors proposés.

1. « Cercle de l'épuration » en REUT

Les paramètres d'intérêt dans les projets de réutilisation d'eau sont les matières en suspension, la pollution carbonée, les nutriments (azote et phosphore), les micropolluants minéraux et organiques, les sels dissous et les microorganismes. La *figure IV-1* ci-dessous propose les différents paramètres à traiter en fonction de l'usage considéré.



source : Ecosse (2001)

Figure IV-1 : « Cercle de l'épuration » en réutilisation des eaux

Quel que soit l'usage considéré dans le « cercle de l'épuration », la désinfection est une étape « toujours » obligatoire. Au même titre, les matières en suspension et les pollutions carbonée, azotée et phosphorée doivent être éliminées. Ces observations impliquent que les filières de traitement des eaux usées en vue d'une réutilisation devront comporter, au minimum, des ouvrages permettant l'abatement des matières en suspension, du carbone, de l'azote, du phosphore et surtout des microorganismes pathogènes. L'irrigation est certainement la pratique qui offre le plus de possibilités de réutilisation.

2. « Modèle européen » proposé par AQUAREC

Le projet de recherche AQUAREC "Integrated Concepts for Reuse of Upgraded Water" a bénéficié d'un soutien européen dans le cadre du cinquième programme de la Commission Européenne dès son origine en 2002. Ses principaux buts étaient de développer des concepts et méthodologies en faveur de la réutilisation des eaux usées traitées. Il prit fin en 2006 et proposa notamment une « matrice de traitement » des eaux usées en fonction de l'usage souhaité. Les combinaisons possibles sont présentées dans l'ANNEXE I, sachant que le *tableau I-1* regroupe les différentes technologies considérées dans ce projet, et les *tableaux I-2, I-3 et I-4* présentent, respectivement, les traitements possibles à partir d'un effluent brut, primaire et secondaire. Dans le *tableau I-1*, les correspondances entre la technique considérée et le numéro attribué (exemple : 001 pour le dégrillage grossier) seront conservées pour les *tableaux I-2, I-3 et I-4*.

Toutes les techniques citées dans le document issu du programme AQUAREC (De Koning *et al.*, 2006) n'ont pas nécessairement été abordées dans ce rapport. L'intérêt de ces tableaux réside dans le fait qu'ils traitent tous les usages possibles des eaux usées traitées et qu'ils offrent, à partir de technologies prédéfinies, un large éventail de possibilités de filières de traitement. Il serait délicat et peu judicieux de s'appuyer exclusivement sur ces exemples mais on peut très bien s'en inspirer. On peut regretter le fait qu'il n'y ait pas d'indication sur la qualité de l'eau obtenue en sortie, que ce soit au niveau chimique ou microbiologique.

Les bases fournies ici permettent à présent de se tourner vers un modèle plus adapté à la France. En effet, il est peu vraisemblable que les usages potables, industriels ou de recharge de nappe se développent d'ici peu et il convient de s'intéresser aux autres emplois possibles. On s'appuiera sur les recommandations fixées par le CSHPF en 1991 pour les usages agricole et urbain (irrigation) avant de développer les applications possibles en fonction de la qualité requise.

3. Niveaux de qualité recommandés par le CSHPF et leurs différentes applications

Le *tableau IV-1* reprend succinctement les recommandations émises en 1991 (sans les contraintes de distance). Faby (1997) s'est basé sur les travaux du CSHPF pour transposer les divers éléments techniques nécessaires liant les cultures, le mode d'irrigation et l'exigence technique aux contraintes sanitaires recommandées par cet organisme. Les *tableaux IV-2 à IV-7* la reprennent.

Tableau IV-1 : Recommandations du CSHPF de 1991

Niveau sanitaire	Œufs d'helminthes	Coliformes fécaux
A	< 1/L	10 ³ / 100 mL
B	< 1/L	Aucune contrainte
C	Aucune contrainte	Aucune contrainte

➤ Maraîchage

Tableau IV-2 : Recommandations du CSHPF appliquées au maraîchage

Types de cultures	Mode d'irrigation	Contrainte Sanitaire	Exigences techniques et restrictions
Cultures maraîchères consommées cuites	Irrigation à la raie	B	Applications intéressantes, comme la culture de pommes de terre
	Irrigation par aspersion	B	Arrosage interdit à moins de 100 m minimum des habitations, des zones de sport et de loisirs, avec mise en place d'écran limitant la propagation d'aérosols
	Irrigation par aspersion	A	100 m minimum des habitations, zones de sports et de loisirs
Cultures maraîchères consommées crues	Irrigation à la raie, gravitaire	A	Arrosage de tout légume possible. Aspersion des légumes consommés crus pas permise. Il faut les irriguer à la raie, ou avec des systèmes qui empêchent le contact direct de l'eau et des parties consommables
N.B : pour une eau de type C, l'arrosage de cultures maraîchères destinées à être consommées crues ou cuites n'est pas recommandé, même avec des systèmes d'arrosage souterrains, localisés ou tout autre moyen permettant de rompre la chaîne de transmission des risques hydriques (paillage plastique, cultures palissées ou sur treillage, ...). On ne peut parler à cet égard d'interdiction mais cette possibilité n'est pas mentionnée dans le texte de recommandations.			

➤ Vergers

Tableau IV-3 : Recommandations du CSHPF appliquées aux vergers

Types de cultures	Mode d'irrigation	Contrainte Sanitaire	Exigences techniques et restrictions
Vergers	Irrigation souterraine-localisée	C	Décantation préalable des effluents
	Irrigation à la raie	B	Décantation préalable des effluents + ajouter des précautions relatives au ramassage des fruits tombés au sol
	Irrigation par aspersion	A	Sans mouillage des fruits
N.B : l'arrosage des vergers peut constituer une application très attractive de la réutilisation des eaux usées traitées. L'irrigation localisée paraît être, dans ce cas, une excellente solution, dès lors que les problèmes posés par les risques de colmatage ont été résolus.			

➤ *Cultures céréalières*

Tableau IV-4 : Recommandations du CSHPF appliquées aux cultures céréalières

Types de cultures	Mode d'irrigation	Contrainte Sanitaire	Exigences techniques et restrictions
Cultures céréalières, industrielles, fourragères, pépinières	Irrigation souterraine-localisée	C	Traitement préalable des effluents
	Irrigation à la raie, localisée, souterraine	B	
	Irrigation par aspersion	B	100 m minimum des habitations, zones de sports et de loisirs, avec mise en place d'écran limitant la propagation d'aérosols
	Irrigation à la raie, localisée, souterraine	A	
	Irrigation par aspersion	A	100 m au minimum des habitations, zones de sports et de loisirs

➤ *Forêts*

Tableau IV-5 : Recommandations du CSHPF appliquées aux forêts

Types de cultures	Mode d'irrigation	Contrainte Sanitaire	Exigences techniques et restrictions
Forêts	Irrigation souterraine-localisée	C	Traitement préalable des effluents
	Tous types sauf aspersion	B	
	Irrigation par aspersion	B	100 m minimum des habitations, zones de sports et de loisirs, avec mise en place d'écran limitant la propagation d'aérosols
	Tous types sauf aspersion	A	
	Irrigation par aspersion	A	100 m au minimum des habitations, zones de sports et de loisirs

➤ *Prairies*

Tableau IV-6 : Recommandations du CSHPF appliquées aux prairies

Types de cultures	Mode d'irrigation	Contrainte Sanitaire	Exigences techniques et restrictions
Prairies	Irrigation par aspersion	B	100 m minimum des habitations, zones de sports et de loisirs, avec mise en place d'écran limitant la propagation d'aérosols ; convient mieux aux cultures céréalières et fourragères qui supportent les restrictions imposées par la prévention des risques sanitaires liés à la dissémination des aérosols
	Irrigation par aspersion	A	100 m au minimum des habitations, zones de sports et de loisirs

➤ *Espaces verts*

Tableau IV-7 : Recommandations du CSHPF appliquées aux espaces verts

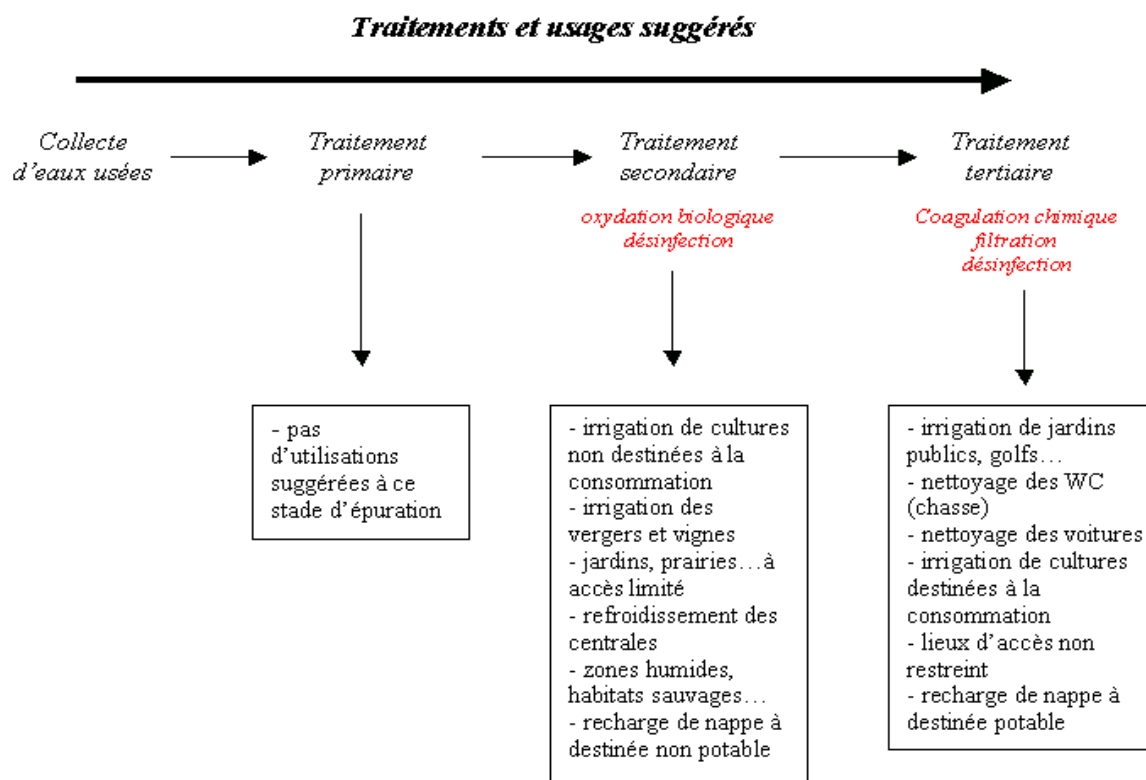
<i>Types de cultures</i>	<i>Mode d'irrigation</i>	<i>Contrainte Sanitaire</i>	<i>Exigences techniques et restrictions</i>
Espaces verts non ouverts au public	Irrigation souterraine-localisée	C	Décantation préalable des effluents
	Irrigation souterraine-localisée	B	100 m minimum des habitations, des zones de sport et de loisirs, avec mise en place d'écran limitant la propagation d'aérosols. Le délai de plusieurs semaines à respecter entre l'arrosage et l'utilisation de terrains de sport interdit pratiquement cette application.
	Irrigation par aspersion	B	100 m minimum des habitations, zones de sports et de loisirs
Espaces verts ouverts au public	Irrigation par aspersion	A	Irrigation en dehors des heures d'ouverture au public, asperseurs de faible portée. 100 m minimum des habitations, zones de sport et de loisirs. L'aspersion des espaces ouverts au public ne peut intervenir qu'en dehors des heures de présence du public.
	Autres que l'aspersion	A	

N.B : les deux dernières restrictions limitent assez sérieusement la possibilité de réutiliser les eaux usées traitées pour l'arrosage des espaces verts ouverts au public. Ceux-ci sont en effet souvent proches des habitations et constitués en grande partie de pelouses arrosées par aspersion. De plus, ils ne sont généralement pas clôturés et leur accès n'est pas nécessairement réglementé. A titre d'exemple, il n'est pas envisageable d'arroser les pelouses des stations méditerranéennes de bord de mer. Cette remarque vaut aussi pour les golfs autour desquels des lotissements sont installés.

Le CSHPF a émis des recommandations concernant la microbiologie des eaux. Il existe donc un vide juridique à propos de la qualité chimique des eaux usées traitées mais un travail prioritaire serait d'élaborer des recommandations en microbiologie qui soient réellement adaptées. En effet, la prise en compte du risque lié aux aérosols a conduit le CSHPF à ajouter, dans ses recommandations, des contraintes de distance entre les activités humaines et le lieu d'aspersion, la France est le seul pays à avoir instauré cette « règle ». Ces contraintes ne s'appuient pas forcément sur des études précises permettant d'affirmer les valeurs seuils imposées sur les distances et pourraient parfois être considérées, pour certains, comme abusivement restrictives. De plus, ces contraintes sont assorties d'exigences complémentaires (rideau d'arbres, asperseurs de courte portée, ...) qui freinent considérablement la mise en place de projets de réutilisation, même avec la plus haute qualité microbiologique (qualité A suivant OMS, 1989 et CSHPF, 1991). *Lazarova et Brissaud (2007)* ont d'ailleurs précisé qu'aucune étude épidémiologique n'avait mis en évidence un effet de l'aspersion sur la santé publique avec des eaux usées traitées de catégorie A telles que définies par l'OMS (1989) et le CSHPF (1991).

4. Différentes filières de traitement en regard des objectifs sanitaires

Avant de développer les différentes filières de traitements permettant d'atteindre les degrés de qualité préconisés par le CSHPF (1991), une matrice des usages possibles en fonction de l'étape de traitement considérée est présentée à la *figure IV-2* qui permet d'entrevoir la structure globale des STEU à mettre en place en fonction de la nature et de l'usage.



source : adapté de l'Agence de Bassin Hydrographique Sahara (2005)

Figure IV-2 : Usages suggérés suivant le niveau de traitement

➤ Pour une eau de qualité C

Aucune limite n'est fixée dans la mesure où les techniques mises en jeu et les types de cultures irriguées assurent une rupture de la chaîne de transmission des risques hydriques (Faby, 1997). Pour des considérations d'ordre technique (hydraulique, colmatage, ...), un traitement préalable des effluents est nécessaire. Parmi les techniques citées, un simple traitement biologique de type boues activées pourrait convenir, de même qu'un traitement chimique par coagulation-floculation-décantation.

➤ Pour une eau de qualité B

Ce niveau de qualité permet d'assurer la protection des populations vis-à-vis du risque parasitologique et notamment le personnel des exploitations agricoles visées. Parmi les différentes techniques abordées dans ce rapport, un traitement par lagunage naturel devrait permettre d'atteindre la contrainte < 1 œuf d'helminthe/L, notamment par sédimentation grâce aux longs temps de séjour.

➤ Pour une eau de qualité A

Ce niveau de qualité vise à assurer la protection des personnels des exploitations, du bétail ainsi que celle des consommateurs de produits pouvant être consommés crus.

Le *tableau IV-8* présente les différentes filières possibles avec leurs efficacités respectives sur les paramètres chimiques d'objectif de qualité, ainsi que sur les paramètres caractérisant la qualité microbiologique d'une eau usée traitée. Les remarques sur les coûts de fonctionnement et l'entretien des filières proposées reposent sur l'analyse globale de la lecture de la bibliographie.

Les technologies du type nanofiltration, osmose inverse ou électrodialyse ne seront pas incluses car adaptées à des cas particuliers non rencontrés actuellement en France : irrigation de cultures sensibles aux sels, production directe ou indirecte d'eau potable, usages industriels.

Parmi les filières présentées, l'association « boues activées – filtration lente sur milieu granulaire » répond aux objectifs de qualité A mais elle restitue des concentrations en coliformes fécaux (*E. coli*) et virus dans des proportions importantes, ce qui pourrait constituer un frein à son développement.

Tableau IV-8 : Performance des filières de traitement des eaux usées permettant une eau de qualité A

Paramètre	DBO ₅	DCO	MES	N _T	P _T	CT	CF	Pr ot.	Œufs d'h.	Virus	Coûts de fct. ^d	Entret. ^e
Unité	mg/L					UFC/100 mL			nombre / L	UFP / 100 mL		
Recommand. CSHPF 1991							< 10 ³		< 1			
Traitement supp.	Si filière en amont = lagunage naturel (LN)											
Sans ^a		< 125	< 150	60 - 70 %	60 - 70 %	< 10 ³	< 10 ³	< 1	< 1	1 - 10 ¹	+	+
Traitement supp.	Si filière en amont = bioréacteur à membranes (BAM)											
Sans	< 5	< 30	< 2	< 5 (N-NH ₄ ⁺) < 10 (N-NO ₃ ⁻)	< 5	< 10 ²		< 1	< 1	1 - 10 ³	+++ à ++++ ^b	+++
Avec désinfection (O ₃)	< 5	< 30	< 2	< 5 (N-NH ₄ ⁺) < 10 (N-NO ₃ ⁻)	< 5	< 1		< 1	< 1	1 - 10 ¹	+++ à ++++ ^b	+++
Traitement supp.	Si filière en amont = boues activées (BA)											
Désinfection seule (O ₃)	25	60	15	Var.	Var.	< 1	< 1	< 1	< 1	1 - 10 ¹	++	++
Lagunage tertiaire ^a		< 125	< 150	Var.	Var.	< 10 ³	< 10 ³	< 1	< 1	1 - 10 ²	+	++ à +++ ^c
Microfiltration (MF)	Res.	Res.	Res.	< 15 (N-NH ₄ ⁺) < 2 (N-NO ₃ ⁻)	< 2 (PO ₄ ³⁻)	< 10 ³	< 10 ³	< 1	< 1	1 - 10 ¹	+++	+++
Ultrafiltration (UF)	Res.	Res.	Res.	< 15 (N-NH ₄ ⁺) < 2 (N-NO ₃ ⁻)	< 2 (PO ₄ ³⁻)	< 10 ³	< 10 ³	< 1	< 1	1 - 10 ¹	+++	+++
MF/UF et désinfection (O ₃)	Res.	Res.	Res.	< 15 (N-NH ₄ ⁺) < 2 (N-NO ₃ ⁻)	< 2 (PO ₄ ³⁻)	< 1	< 1	< 1	< 1	1 - 10 ¹	+++	+++ à ++++
Filtration lente sur milieu granulaire	< 15	< 60	< 15	Var.	Var.	< 10 ⁴	< 10 ³	< 10 ¹	< 1	10 ² - 10 ³	++	++ à +++
Infiltration- percolation sur sable (h > 1,5 m)	< 15	< 60	< 15	Var.	-	< 10 ³	< 10 ³	< 1	< 1	1 - 10 ²	++	++ à +++
Filtration lente sur milieu granulaire + désinfection (O ₃)	< 15	< 60	< 15	Var.	Var.	< 1	< 1	< 1	< 1	1 - 10 ¹	++	++ à +++

CT = Coliformes Totaux ; CF = Coliformes Fécaux ; Prot. = Protozoaires ; Œufs d'h. = Œufs d'helminthes

Recommand. = recommandations ; Res. = Résiduel ; Var. = Variable

(a) : les résultats sont très variables suivant le temps de séjour. Les données présentées sont celles que l'on peut espérer atteindre avec un ouvrage correctement dimensionné pour la fonction souhaitée (désinfection, réduction de la pollution azotée, ...).

(b) : élevés si à membranes immergées et très élevés si à membranes externes

(c) : devient contraignant lors du curage des lagunes

(d) : coûts de fonctionnement ; + = faible ; ++ = moyen ; +++ = élevé ; ++++ = très élevé

(e) : entretien ; + = peu contraignant ; ++ = moyennement contraignant ; +++ = contraignant ; ++++ = très contraignant

Conclusion

En constante évolution dans le monde entier, la REUT a pourtant des difficultés à être sérieusement considérée en France. Les usages agricole et urbain (irrigation) seraient les plus susceptibles de se développer mais la situation hydrique n'encourage pas les décideurs publics à s'orienter vers ce type de ressource. Toutefois, l'existence de zones contrastées au sein du territoire pourrait inciter à son emploi. Fort de ce constat, il semble alors peu vraisemblable que la réutilisation des eaux se développe à grande échelle, mais plutôt comme une myriade de projets de modeste envergure.

Construire un projet de REUT « valable » est une démarche longue et délicate. En France, les bases réglementaire, technique et sociale à ce sujet sont encore trop fragiles pour permettre le développement de cette pratique. C'est donc dans un souci d'étoffer les connaissances techniques françaises que ce travail a été réalisé.

L'identification préalable des paramètres d'intérêt en REUT a permis de cibler les technologies de traitement. Parmi les différents paramètres des eaux usées, les microorganismes pathogènes (virus, bactéries, protozoaires, œufs d'helminthes), les micropolluants organiques et inorganiques ainsi que les sels dissous sont ceux qui doivent bénéficier du maximum d'attention. Il est vrai que la salinité n'est pas un problème en France mais ce travail se veut de nature prospective et les divers bouleversements environnementaux de ce siècle pourraient bien accélérer les choses. Les connaissances sur ces paramètres sont encore très variables : l'identification d'un risque bactérien lié à une réutilisation des eaux est fort de quelques 150 années d'étude alors que la prise de conscience d'un risque chimique, plutôt relatif, est récente. Un manque de connaissances de ces effets à long terme ainsi que l'apparition de substances émergentes pourraient inciter à une certaine vigilance et des études plus poussées. Pour l'instant, la gestion de ce risque passe par l'élaboration de seuils à un niveau recommandé.

L'expérience mondiale de la réutilisation a permis de lister une panoplie assez conséquente de technologies de traitement, en relation avec les paramètres cités ci-dessus. Les procédés de désinfection permettent bien souvent de s'affranchir du risque lié aux microorganismes et les technologies membranaires se révèlent efficaces sur les pollutions dissoutes et/ou résiduelles. En France, il semble que les systèmes lagunaires, les bioréacteurs à membranes (avec ou sans désinfection) et les boues activées couplés à un traitement tertiaire de type désinfection seule, filtration (sur milieu granulaire et/ou technologies membranaires ; avec ou sans désinfection) et lagunage tertiaire soient les plus à même de répondre aux exigences de qualité A recommandées par le CSHPF. Bien qu'elles soient « récentes », les techniques de filtration membranaire (microfiltration, ultrafiltration, bioréacteur à membranes, ...) font alors ici leurs preuves. L'innovation technologique au service de l'assainissement permet d'atteindre des niveaux de qualité d'eau usée traitée très compatible avec la contrainte de niveau A et pourrait favoriser ainsi le développement de tels projets. Notons que les eaux, prélevées en rivière pour des fins d'usage agricole peuvent être de qualité moindre que ce niveau.

En complément des techniques abordées dans ce rapport, une étude de coût aurait été très intéressante et l'étude plus approfondie de l'entretien de ces ouvrages aurait été judicieuse. Toutefois, rappelons que les coûts de construction, de maintenance sont en profonde mutation, notamment parmi les technologies membranaires et les quelques chiffres avancés auraient rapidement été désuets. L'entretien est aussi une question épineuse, surtout pour les technologies membranaires où les progrès actuels tendent à rendre les opérations de maintenance moins fréquentes et moins contraignantes. Malgré tout, quelques éléments ont été fournis dans ce rapport et permettent de cerner, plus ou moins efficacement, les ouvrages d'entretien facile et ceux qui le sont beaucoup moins.

Bibliographie

- Agence du Bassin Hydrographique Sahara**(2005). Powerpoint : L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation.
- Agence de l'Eau Rhin-Meuse** (2007). Etat des lieux des systèmes d'épuration des petites collectivités - Filtres plantés de roseaux à écoulement horizontal. **11**, 8.
- Alexandre, O., Boutin, C., Duchene, P., Lagrange, C., Lakel, A., Liénard, A. and Ortiz, D.** (1997). Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités, *Document technique, FNDAE, n°22*, 88p + annexes.
- Asano, T.** (1998). Wastewater reclamation and reuse, 1528 pp. Water quality management library, **10**. 11 vols. CRC Press.
- Asano, T., Burton, F.L., Leverenz, H.L., Tsuchihashi, R. and Tchobanoglous, G.** (2007). Water reuse. Issues, technologies, and applications, 1570 pp, edited by M. Eddy. Mac Graw Hill.
- Balmer, M.E., Buser, H.R., Muller, M.D. and Poiger, T.** (2005). Occurrence of some organic UV filters in wastewater, in surface waters, and in fish from Swiss lakes. *Environmental Science and Technology*, **39**(4), 953-962.
- Baumont, S.** (2004). Réutilisation des eaux usées épurées : risques et faisabilité en Ile de France. Rapport de stage, ENSAT (Toulouse).
- Berland, J.M., Boutin, C., Molle, P. and Cooper, P.** (2001). Guide des procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptées aux petites et moyennes collectivités (500 - 5 000 eq hab) 41p
- Berland, J.M. and Juery, C.** (2002). Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. *Document technique, FNDAE, 14*.
- Blum, A.** (2005). Les prélèvements d'eau en France et en Europe. *Les données de l'environnement. IFEN*, 104.
- Blumenthal, U.J., Mara, D.D., Peasey, A., Ruiz-Palacios, G. and Stott, R.** (2000). Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: Recommendations for revising WHO guidelines. *Bulletin of the World Health Organization*, **78**(9), 1104-1116.
- Canler, J.P.** (2001). Performances des systèmes de traitement biologique aérobie des graisses issues des dégraisseurs de stations d'épuration traitant des effluents à dominante domestique. *Document technique, FNDAE, n°24*, 64.
- Canler, J.P. and Perret, J.M.** (2004). Etude des pré-traitements compacts basés uniquement sur le tamisage fin. Cas du traitement des eaux résiduaires urbaines ou domestiques *Document technique, FNDAE, n°28*, 64.
- Canler, J.P. and Perret, J.M.** (2007). Les clarifloculateurs plus particulièrement utilisés en traitement tertiaire. *Document technique, FNDAE, n°35*, 69p+ annexes
- Choubert, J.M., Pomies M., Martin Ruel S. and Coquery M.** (2009). Influent concentrations and removal performances of metals through conventional and advanced municipal wastewater treatment processes. Technologies XENOWAC 2009 (*Xenobiotics in the Urban Water Cycle*). 11-13 Mars 2009. Chypre. + Actes 6 p (CO).

- Commission « assainissement » de l'AGHTM : Cauchi, Hyvrard, Nakache, Schwartzbrod, Zagury, Baron, Carré, Courtois, Denis, Dernat, Larbaigt, Derangere, Martigne, Seguret.** (1996). La réutilisation des eaux usées après épuration. *Techniques Sciences & Méthodes*, **2**, 81-118.
- Conseil Général du Finistère –CG29-DEE-SATEA** (2008). ANNEXE 11. Les traitements tertiaires de désinfection.
- CSHPF** (1991). Recommandations sanitaires concernant l'utilisation, après épuration, des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation des cultures et des espaces verts, 40 pp, édité par le Ministère chargé de la Santé, Paris.
- De Koning, J., Bixio, D., Karabelas, A., Salgot, M. and Schafner, A.** (2008). Characterisation and assessment of water treatment technologies for reuse. *Desalination*, **218**(1-3), 92-104.
- De Koning, J., Miska, V. and Ravazini, A.** (2006). Integrated Concepts for reuse of Upgraded Wastewater Water treatment options in reuse systems. Projet européen **AQUAREC**. EVK1-CT-2002-00130, Mai 2006.
- Ecosse, D.** (2001). Techniques alternatives en vue de subvenir à la pénurie d'eau dans le monde. Mémoire de DESS, Faculté des Sciences d'Amiens.
- Faby, J.A.** (1997). L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation, *Document technique, FNDAE, Hors série n°11* 80 pp
- Gérin, M., Gosselin, P., Cordier, S., Viau, C., Quénel, P. and Dewailly, E.** (2003). Environnement et santé publique – Fondements et pratiques, pp. 1023. Tech&Doc.
- Johnson, A.C., Aerni, H.R., Gerritsen, A., Gibert, M., Giger, W., Hylland, K., Jurgens, M., Nakari, T., Pickering, A., Suter, M.J.F., Svenson, A. and Wettstein, F.E.** (2005). Comparing steroid estrogen, and nonylphenol content across a range of European sewage plants with different treatment and management practices. *Water Research*, **39**(1), 47-58.
- Juery, C.** (2004). Définition des caractéristiques techniques de fonctionnement et domaine d'emploi des appareils de désinfection, *Document technique, FNDAE, n°2*, 50p+annexes
- Kitis, M.** (2004). Disinfection of wastewater with peracetic acid : A review. *Environment International*, **30**(1), 47-55.
- Lagana, A., Bacaloni, A., De Leva, I., Faberi, A., Fago, G. and Marino, A.** (2004). Analytical methodologies for determining the occurrence of endocrine disrupting chemicals in sewage treatment plants and natural waters. *Analytica Chimica Acta*, **501**(1), 79-88.
- Lazarova, V. et Brissaud, F.** (2007). Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France. *L'eau, l'industrie et les nuisances*, **299**, 43-53.
- Mediterranean Wastewater Reuse Working Group** (2007). Mediterranean Wastewater Reuse Report, (MED WWR WG). Commission Européenne (Novembre 2007), 50p.
- Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Agences de l'eau** (2003). Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau, grilles d'évaluation SEQ-Eau (version 2), 40 p.
- Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable** (2007). Les limites de qualité réglementaires pour les pesticides dans l'eau potable, 2 p.
- Monchalain, G.** (1999) repris par **Aviron-Violet, J.** (2002). La réutilisation des eaux usées après traitement, 39 pp, édité par le CGGREF, **22**

- Naud, P.Y.** (2006). Etude des déchets issus des postes de prétraitement des stations d'épuration. Mémoire de fin de stage, INSA Toulouse.
- OMS** (1989). L'utilisation des eaux usées en agriculture et aquaculture : recommandations à visées sanitaires, 84 pp, **778 (série de rapports techniques)**, Genève.
- OMS** (2004). Directives de qualité pour l'eau de boisson : 3^{ème} édition volume 1 Recommandations, OMS Genève, 110 p.
- Ottoson, J., Norström, A. and Dalhammar, G.** (2005). Removal of micro-organisms in a small-scale hydroponics wastewater treatment system. *Letters in Applied Microbiology*, **40**(6), 443-447.
- Pham, T.T. and Proulx, S.** (1997). PCBs and PAHs in the Montreal urban community (Quebec, Canada) wastewater treatment plant and in the effluent plume in the St Lawrence river. *Water Research*, **31**(8), 1887-1896.
- Racault, Y.** (2004). Les bioréacteurs à membrane pour le traitement des effluents domestiques. *Fiche Cemagref*, 2.
- Ternes, T.A., Janex-Habibi, M., Knacker, T., Kreuzinger, N. and Siegrist, H.** (2005). Assessment of technologies for the removal of pharmaceuticals and personal care products in sewage and drinking water facilities to improve the indirect potable water reuse. Contrat *Poseidon* n°EVK1-CT-2000-00047, [http:// :www.eu-poseidon.com](http://www.eu-poseidon.com), 58 p.
- Seira, J.** (2008). Les technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées épurées (REUE), mémoire de stage de 2^{ème} année d'ingénieur Polytech Montpellier.
- Shilton, A.** (2005). Pond Treatment Technology. Integrated Environmental Technology Series. IWA Publishing, 479 p.
- US-EPA** (1992). Guidelines for Water Reuse, 247 pp, edited by USAID, Washington D.C.
- US-EPA** (2004). Guidelines for water reuse EPA/625/R-08/108, Septembre 2004, 286 p. + annexes.
- WHO** (1998). Environmental Health Criteria For Boron. International Programme On Chemical Safety. UNEP.
- WHO, UNEP, FAO** (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2: wastewater in agriculture, 222p
- WorldWaterCouncil** (2000). L'avenir de l'eau. Chapitre 3. 30.

ANNEXE A - Recensement des sites français de REUT à l'été 2008

Sources : Faby, 1997 ; Commission «assainissement» de l'AGHTM, 1996

Remarque : les villes dont les projets ont été abandonnés AVEC certitude sont accompagnées d'un astérisque *

1 – Maraîchage

<i>Ville</i>	<i>Département</i>	<i>Mail / Téléphone</i>	<i>Année de mise en service</i>	<i>Filière</i>	<i>Capacité (EH)</i>	<i>Installation</i>	<i>Surface et/ou volume employés</i>	<i>Usage et technique</i>
Ars-en-Ré	Charente-Maritime (17)	05 46 29 40 21	1985	Boues activées + filtres + chloration	2 500 (été) 1 200 (hiver)	Bâche de pompage Bassin de stockage Réseaux d'aspersion 2 kms de canalisation	S = 90 ha V = 300 m ³ /j	Aspersion + épandage sur pommes de terre
Alès	Gard (30)	08 00 54 05 40	1964	Boues activées	80 000	Bâche de relevage Canal d'irrigation (3 kms)	S = 100 ha V = 9 000 m ³ /j	Epandage sur pommes de terre + haricots verts + tomates + choux-fleurs
La Cerreire de Montpellier	Hérault (34)	-	-	-	-	-	S = 0,5 ha V = 18 m ³ /h	Epandage sur cultures maraîchères + irrigation localisée
Achères	Yvelines (78)	01 39 79 64 00	Fin XIX ^{ème}	Aucune	200 000 à 250 000	Emissaires de plusieurs dizaines de kms Réseaux sous pression	S = 585-2 000 ha V = 100 000 m ³ /j	Epandage sur cultures maraîchères + irrigation à la raie
Porquerolles	Var (83)	contact@porquerolles.com	1976	Boues activées	3 000 (été) 300 (hiver)	Lagunage à macro et microphytes Lagunage mixte Bâche de pompage Réseaux d'irrigation sous frondaison	S = 30 ha V = 450 m ³ /j	Epandage sur cultures maraîchères + irrigation à la raie et localisée
Noirmoutier La Salaisière	Vendée (85)	Info@ile-noirmoutier.com	1981	Boues activées + lagunage	26 000	Bassins de stockage Station de pompage Réseau d'irrigation enterré	S = 220 ha	Epandage sur pommes de terre + courgettes
Barbatre	Vendée (85)	mairie.barbatre@wanadoo.fr	1991	Lagunage aéré	10 000	Bassins de stockage	S = 35 ha	Irrigation des pommes de terre

2 – Vergers

<i>Ville</i>	<i>Département</i>	<i>Mail / Téléphone</i>	<i>Année de mise en service</i>	<i>Filière</i>	<i>Capacité (EH)</i>	<i>Installation</i>	<i>Surface et/ou volume employés</i>	<i>Usage et technique</i>
Alès	Gard (30)	08 00 54 05 40	1964	Boues activées	80 000	Bâche de relevage Canal d'irrigation (3 kms)	S = 100 ha V = 9 000 m ³ /j	Epandage sur vergers
Maclas*	Loire (42)	04 74 87 38 04	1970 - 1980	Lagunage	1 000	Pompage	S = 3 à 4 ha	Arbres fruitiers
Cellieu*	Loire (42)	mairie.cellieu@wanadoo.fr	1976 - 1994	3 lagunes	-	5 retenues collinaires	-	Arbres fruitiers
Porquerolles	Var (83)	contact@porquerolles.com	1976	Boues activées	3 000 (été) 300 (hiver)	Lagunage à micro et macrophytes Bâche de pompage Réseaux d'irrigation sous frondaison	S = 30 ha V = 450 m ³ /j	Epandage sur pêcheurs, amandiers + irrigation à la raie et localisée

3 – Cultures céréalières, industrielles, fourragères – Pépinières, peupleraie, horticulture

<i>Ville</i>	<i>Département</i>	<i>Mail / Téléphone</i>	<i>Année de mise en service</i>	<i>Filière</i>	<i>Capacité (EH)</i>	<i>Installation</i>	<i>Surface et/ou volume employés</i>	<i>Usage et technique</i>
Le Revest du Bion	Alpes-de-Haute-Provence (04)	commune.revestdubion@orange.fr	1985	Boues activées	1 000	Bassins de stockage Pompage	S = 1 à 2 ha V = 80 m ³ /j	Semence de tournesol
Ars-en-Ré	Charente-Maritime (17)	05 46 29 40 21	1985	Boues activées + filtres + chloration	2 500 (été) 1 200 (hiver)	-	S = 73 ha	Epandage sur maïs et tournesol + irrigation à la raie
Saint-Georges-de-Didonne	Charente-Maritime (17)	bulletinmu@saintgeorgesdedidonne.com	1980	-	-	-	S = 7 ha 2 m ³ /h < V < 8 m ³ /h	Epandage sur maïs + aspersion
Le Châtelet	Cher (18)	02 48 56 21 21	1997	Boues activées + lagunage	1 000 + abattoir de volailles	Non défini 5 kms de canalisation	S = 300 ha	Prairies

Rians	Cher (18)	02 48 64 42 08	1978	-	-	Station de pompage 12 kms de canalisation canons d'irrigation	S = 350 à 400 ha V = 700 m ³ /j	Prairies, luzernes et maïs fourrager
Alès	Gard (30)	08 00 54 05 40	1964	Boues activées	80 000	Bâche de relevage Canal d'irrigation (3 kms)	S = 100 ha V = 9 000 m ³ /j	Epandage sur maïs et tournesols par submersion
Saint-Jean- de-Buèges	Hérault (34)	04 67 73 10 64	-	-	-	-	S = 1,5 ha	Epandage sur peupleraie et irrigation à la raie
Noizilly	Indre-et-Loire (37)	02 47 56 12 21	1993	Boues activées	4 200	Bassin de stockage (mélange eaux usées traitées et eaux de pluie) Canon d'arrosage	S = 50 ha V = 650 m ³ /j	Maïs fourrager, luzerne
Loudun	Vienne (38)	05 49 98 15 38	2003	Station en cours de réhabilitation	10 000	Lagune de 50 000 m ³	S = 100 ha	Maïs et tournesol
Mirebeau	Vienne (38)	05 49 50 40 53	Projet 1997	Boues activées avec aération prolongée Lagunage	1 000	-	V = 400 m ³ /j	Maïs, tournesol
Coullons	Loiret (41)	coullons.mairie@ wanadoo.fr	1994	Physico- chimique + lagunage aéré + flottation	4 000	2 lagunes 5 aérateurs 1 station de pompage	S = 94 ha V = 300 m ³ /j	Maïs
Gidy	Loiret (41)	mairie.gidy@wanadoo.fr	-	Boues activées	1 500	Lagunes (8 à 10 ha)	S = 100 ha V = 600 m ³ /j	Maïs
Chemillé	Maine-et-Loire (49)	mairie.chemille@ wanadoo.fr		Boues activées	8 000	Stockage 45 000 m ³		Mais
Le Mesnil en Vallée	Maine-et-Loire (49)	02 41 78 52 13	1995	Lagunage aéré	2 500	Bâches de pompage 17 kms de réseau 47 bornes d'irrigation 4 enrouleurs	S = 85 à 170 ha V = 235 m ³ /j	Maïs et pépinières

Mont Saint Michel	Manche (50)	02 33 60 14 06	1994	Boues activées Lagunes	5 000 (hiver) 10 000 (été)	Lagune de stockage Station de pompage Réseau avec aéroasperseurs	-	Prairies, maïs fourrager
Saint Armel	Morbihan (56)	http://saint.armel.breizhoo.fr	1997	Lagunage	700 puis 1 200	-	S = 120 ha	Légumes (haricots verts, carottes...)
Bailleul sur Bertoult	Pas-de-Calais (62)	-	-	-	-	-	S = 0,6 ha V = 5 cm/j	Epandage sur peupleraie + irrigation à la raie
Clermont-Ferrand	Puy de Dôme (63)	contact@ville-clermont-ferrand.fr	1996	Boues activées + lagunage tertiaire	300 000	Réaménagement des lagunes de la sucrerie de Bourdon	S = 700 ha V = 25 000 m ³ /j	Maïs, betterave, luzerne
Achères	Yvelines (78)	01 39 79 64 00	Fin XIX ^{ème}	Aucune	200 000 à 250 000	Emissaires de plusieurs dizaines de kms Réseaux sous pression	S = 242 ha pép. S = 665 ha maïs V = 120 000 m ³ /j	Epandage sur pépinières + peupleraies, maïs
Melle	Deux-Sèvres (79)	contact@ville-melle.fr	1994	Boues activées Nitrif./Dénitrif. Déphosphatation physico-chimique	-	2 lagunes d'hygiénisation 1 bassin de stockage 1 bassin de refoulement 1 km de canalisation Canons d'irrigation	-	Maïs
Oppède	Vaucluse (82)	mairie-oppede@wanadoo.fr	-	-	-	-	S = 1 ha	Epandage sur peupleraie + irrigation localisée et submersion
Saint Genest	?	-	1983	Boues activées	7 000	Utilisation de l'ancien réseau de distribution des boues Pompes de refoulement 3 canons d'irrigation	S = 5 ha	Maïs, prairies

4 – Forêts, Maquis

<i>Ville</i>	<i>Département</i>	<i>Mail / Téléphone</i>	<i>Année de mise en service</i>	<i>Filière</i>	<i>Capacité (EH)</i>	<i>Installation</i>	<i>Surface et/ou volume employés</i>	<i>Usage et technique</i>
Saint-Ouen-de-Thouberville	Eure (27)	mairie.saintouenthouberville@wanadoo.fr	-	-	-	-	-	Epandage + irrigation
Cerbère-Peyrefitte	Pyrénées-Orientales (66)	mairie@cerbere-village.com	1992	Biofiltres + traitements physico-chimiques	5 000 à 7 000 (été) 1 500 (hiver)	Station de relevage 2 rampes en fonte multijets 2 kms de canalisation	S = 3 ha	Epandage sur maquis, garrigue
Cogolin*	Var (83)	mairie@cogolin.fr	1981-1988	Boues activées + lagune tertiaire	-	Station de relevage 3 kms de canal Réseau avec asperseurs + goutte à goutte	S = 2,18 ha	Epandage sur forêts + aspersion et irrigation localisée

5 – Prairies

<i>Ville</i>	<i>Département</i>	<i>Mail / Téléphone</i>	<i>Année de mise en service</i>	<i>Filière</i>	<i>Capacité (EH)</i>	<i>Installation</i>	<i>Surface et/ou volume employés</i>	<i>Usage et technique</i>
Le Châtelet	Cher (18)	02 48 56 21 21	1997	Boues activées + lagunage	1 000 + abattoir de volailles	Non défini 5 kms de canalisation	S = 300 ha	Prairies
Alès	Gard (30)	08 00 54 05 40	1964	Boues activées	80 000	-	-	Submersion + épandage sur prairies
Landiras	Gironde (33)	05 56 62 50 28	-	-	-	-	S = 0,8 ha	Epandage sur prairies + aspersion
Achères	Yvelines (78)	01 39 79 64 00	Fin XIX ^{ème}	Aucune	200 000 à 250 000	Emissaires de plusieurs dizaines de kms Réseaux sous pression	S = 524 ha V = 120 000 m ³ /j	Irrigation à la raie

6 – Espaces verts (golfs, jardins publics, terrains de sport)

<i>Ville</i>	<i>Département</i>	<i>Mail / Téléphone</i>	<i>Année de mise en service</i>	<i>Filière</i>	<i>Capacité (EH)</i>	<i>Installation</i>	<i>Surface et/ou volume employés</i>	<i>Usage et technique</i>
Grasse	Alpes-Maritimes (06)	mairie@ville-grasse.fr	1992	Système enterré Cuves avec agitateurs Bacs de décantation Filtration lente sur sable	80 à 100	3 bassins de stockage	S = 30 ha V = 15 m ³ /j	Golf (saison estivale)
Portes-en-Ré	Charente-Maritime (17)	05 46 29 50 56	-	-	-	-	V _{été} = 600 m ³ /j	Irrigation sur golf (d = 8,5 km) + aspersion et/ou irrigation souterraine
Saint-Palais-sur-Mer	Charente-Maritime (17)	secretariat@stpalaissurmer.fr	1991	Boues activées + filtres + chloration	175 000	Lagunes de stockage Réseau d'irrigation	S = 55 – 60 ha V = 2 300 m ³ /j	Epandage sur golf + aspersion en nocturne (2,5 mm/m ² /h)
Saint-Pierre	Charente-Maritime (17)	05 46 47 02 83	1994	Boues activées Traitement U.V	1 200	Bâche de pompage 7 kms de canalisation Lagune de stockage Station de filtration et U.V 16 néons – canal ouvert	S = 25 ha V = 400 m ³ /j	Golf
Chanceaux sur Choissille	Indre-et-Loire (37)	mairie.chanceux_choisille@wanadoo.fr	1993	Boues activées	4 000	Lagune de finition Station de pompage 400 m de canalisation Bouches d'arrosage et d'asperseurs	S = 5 ha	Aspersion terrain de sports et jardins publics
Lentigny*	Loire (42)	mairie.lentigny@wanadoo.fr	1993 - 1994	Lagunages	-	-	-	Terrain de sport
Pornic	Loire-atlantique (44)	contact@pornic.fr	1992	Boues activées avec aération prolongée Déphosphatation Chloration-déchloration Filtre à sable	22 000	Station de refoulement 5 kms de canalisation Bassins de stockage	S = 34 ha V = 1 200 m ³ /j	Golf

Baden	Morbihan (56)	mairie@baden.fr	1989	Lagunage	2 000	Bassins de stockage (agrandissement et surcreusement de zones marécageuses)	S = 70 ha V = 250 m ³ /j	Aires de jeux et golf
Bormes-le- Lavandou	Var (83)	04 94 05 19 70	1994	Physico-chimique + biofiltres pouzzolane	15 000	Puits de pompage Réserve de 30 000 m ³ Réseau d'irrigation	S = 20 – 30 ha V = 700 m ³ /j	Aspersion nocturne + épandage souterrain

7 – Autres sites existants ou en cours - en projet (pas de données précises à leur sujet)

- Villeneuve les Maguelone [Hérault (34), *contact* : 04 67 69 75 75 (hôtel de ville) ou consultation sur le site de la ville]
- Saint Mathieu de Trévières [Hérault (34), *contact* : accueil@mairie-saint-mathieu-de-treviers.net]
- Montaut [Landes (40), *contact* : 05 58 76 05 13]
- Biscarosse [Landes (40), *contact* : biscarosse@ville-biscarosse.fr]
- Bègles [Gironde (33), *contact* : webmaster@mairie-begles.fr ou 05 56 49 88 88]
- Champdeniers [Deux-Sèvres (79), *contact* : 05 49 25 80 47]
- Le Fuiet [Maine-et-Loire (49), *contact* : mairielefuiet.accueil@orange.fr]
- Saint Lyphard [Morbihan (56), *contact* : 02 40 91 41 08 ou directement sur le site de la ville]
- Reims [Marne (51), *contact* : 03 26 77 78 79 ou directement sur le site de la ville]
- Juilley [Manche (50), *contact* : 02 33 60 65 17]
- Folligny [Manche (50), *contact* : 02 33 61 33 11]
- Saint Romphaire [Manche (50), *contact* : 02 33 55 71 72]
- Bonifacio [Corse-du-Sud (2A), *contact* : 04 95 73 56 12]
- Narbonne [Aude (11), *contact* : 04 68 90 30 30 ou directement sur le site de la ville]
- Grau du Roi [Gard (30), *contact* : communication@ville-legrauduroi.fr ou directement sur le site de la ville]
- Saint Félix de Reilhac [Dordogne (24), *contact* : mairie.saint-felix-de-reilhac@wanadoo.fr]
- Ribagnac [Dordogne (24), *contact* : 05 53 58 32 13]
- Saint Florent le Vieil [Maine-et-Loire (49), *contact* : contact@ville-saintflorentlevieil.fr]
- Nantes [Loire-Atlantique (44), *contact* : directement sur le site de la ville]
- Agon [Manche (50), *contact* : 02 33 47 07 56]

ANNEXE B - Site de réutilisation des eaux des eaux usées de Clermont-Ferrand

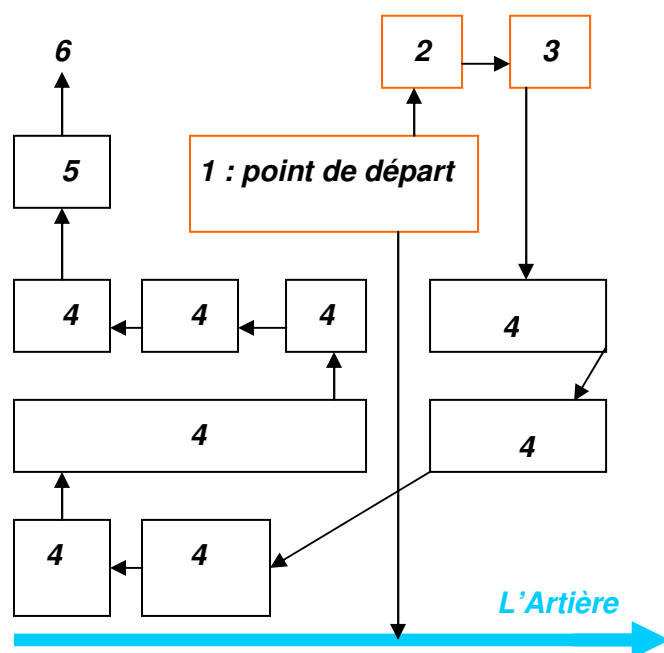
source : adapté de Baumont, 2004

Le projet de Clermont-Ferrand est le cas le plus important de réutilisation des eaux usées traitées en France. Initié en 1989 par l'Association Syndicale Autorisée (ASA) de Limagne Noire, elle n'a été définitivement autorisée qu'en 1995, sous réserve de la mise en place d'un *suivi épidémiologique*. En 1996 et 1997, l'irrigation se faisait sur 55 ha (réseau pilote) : puis en 1998, le périmètre s'est étendu à 580 ha, sur 8 communes totalisant 17 000 habitants et depuis 1999, la surface irriguée est de 700 ha.

La station de Clermont-Ferrand a une capacité de 420 000 EH. Le débit moyen des effluents est de 50 000 m³ par jour au mois d'août. En hiver, le traitement des eaux usées est classique : après un prétraitement, les effluents passent dans un bassin boues activées. Les eaux usées traitées ne sont pas réutilisées pendant cette saison et elles sont rejetées dans la rivière Artière. Cependant pendant la saison d'irrigation (de mai à octobre), les effluents subissent un autre traitement : ils passent par des lagunes de stabilisation. Ces lagunes appartiennent en fait à une sucrerie joutant la station (sucrerie de Bourdon). D'octobre à mai, la sucrerie utilise les lagunes pour stocker et par la même occasion, traiter ses propres effluents mais pendant l'été, elle les met à disposition des agriculteurs. Il y a en tout 8 lagunes représentant une surface totale de 13 ha et un volume de 312 000 m³ (l'ensemble constitue un temps de séjour total de l'ordre de 13 jours). Elles permettent aux effluents d'atteindre la qualité requise pour l'irrigation (niveau A fixé par les recommandations du CSHPF de 1991). Les principales cultures sont le maïs, la maïs-semence et la betterave.



source : Google MAP



Légende

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 : Ouvrage de sortie STEU Clermont | 4 : Système lagunaire (lagunes de Bourdon) |
| 2 : Prise d'eau | 5 : Station de reprise |
| 3 : Station d'exhaure | 6 : Vers le périmètre d'irrigation |

Figure B-1 : Schématisation de l'organisation du projet de REUT de Clermont-Ferrand

Au début de la saison d'irrigation, les lagunes sont vidées de leurs effluents industriels, via le système d'irrigation. La phase d'épandage de ces effluents dure quelques semaines. Dès que les lagunes sont vides, elles sont remplies par les eaux traitées de la station, qui prennent alors le relais de la campagne d'irrigation. Ainsi les volumes moyens annuels pour l'épandage sont de 193 000 m³ alors que pour l'irrigation, ils sont de 1 070 000 m³ (données STEU Clermont, visite du 23/07/2008). Le volume total moyen annuel est donc environ de 1 260 000 m³.

➤ *Etude épidémiologique*

A la demande du CSHPF, un suivi épidémiologique a été mis en place à partir de 1996 pour l'opération de REUT à des fins agricoles de la région de Clermont-Ferrand. La zone concernée couvre plus de 500 ha et compte plus de 17 000 habitants.

L'étude s'intéresse à deux catégories de population : la population générale et les travailleurs saisonniers, embauchés durant l'été pour la castration du maïs. La technique d'irrigation utilisée est l'aspersion. La population générale est donc exposée via l'inhalation des gouttelettes d'eau et les travailleurs agricoles via l'inhalation et l'ingestion (accidentelle) d'eau. L'étude s'est déroulée en deux étapes : en 1996 et 1997, le maïs était irrigué avec des eaux de rivière ; un suivi épidémiologique auprès des travailleurs saisonniers et de médecins et pharmaciens de la région (respectivement au nombre de 15 et 7) a été mis en place afin d'établir le « bruit de fond » lié aux pathologies de la médecine générale. Puis en 1998, l'opération de la REUT a été mise en place et le suivi épidémiologique a continué selon les mêmes modalités, afin de repérer d'éventuelles modifications de ce « bruit de fond ». D'autre part, des analyses de la qualité de l'eau ont été effectuées.

Les analyses de la qualité microbiologique (coliformes thermotolérants, entérocoques et salmonelles) des eaux traitées ont montré que le traitement par lagunage était efficace pour l'abattement des bactéries indicatrices de contamination fécale. Il n'a été observé aucune contamination dans le réseau d'irrigation. Il n'y a pas eu d'analyse chimique, procédure qui devrait être envisagée dans le cas d'une étude sanitaire complète.

Les analyses de l'eau après le lagunage ont montré que l'eau utilisée précédemment (*i.e.* eau de rivière) avait une concentration en germes témoins de contamination fécale GTCF (coliformes thermotolérants et entérocoques) égale à celle des effluents secondaires (= 10⁵ UFC / 100 mL), c'est-à-dire, aux effluents avant le traitement par lagunage, traitement considéré comme indispensable pour une opération de REUT. Ce résultat pourrait donc signifier que l'utilisation d'eau de surface est plus dangereuse que l'utilisation d'effluents traités par lagunage. Cependant, cette comparaison est à manier avec précaution car l'utilisation des GTCF ne permet pas d'affirmer avec certitude que les concentrations en germes pathogènes sont différentes. La recherche d'œufs d'helminthes (dans l'eau après le lagunage) est négative. Pour les bactéries pathogènes, il a été trouvé des salmonelles. Leur recherche fut uniquement qualitative, les doses d'exposition n'ont donc pu être déterminées. Aucun entérovirus n'a été détecté dans l'unique analyse, qu'il aurait été intéressant de compléter. Pour ce qui est des aérosols, ceux issus d'eau traitée sont plus chargés en microflore totale que ceux d'eau de surface.

La mise en place de la REUT en 1998 n'a pas augmenté le nombre de cas de maladie déclarés ou de médicaments vendus par rapport au « bruit de fond » de 1996 et 1997, dans la population générale. Les enquêtes menées chez les écimeurs de maïs ne révèlent pas non plus d'augmentation des symptômes déclarés. La REUT à caractère agricole ne semble donc présenter aucun risque pour les travailleurs et la population générale dans cette étude.

ANNEXE C
***Quelques sites de réutilisation des eaux usées traitées dans le
Maine et Loire***
Compte rendu de visite réalisée le 15 avril 2008

M. Mulliez : Chambre de l'agriculture du Maine et Loire
M. Peigner : DDASS Maine et Loire
C. Boutin, A. Héduit, J-M. Helmer : Cemagref Epuration

Station de traitement des eaux usées de Andrezé : M. Laurendeau , agriculteur irrigant + M Morinière, ancien adjoint au maire.

Station de traitement des eaux usées de Chemillé : Responsable services techniques assainissement, + M Barranger principal agriculteur irrigant.

Objectif Cemagref

Prendre en compte des contextes de réutilisation d'eaux usées traitées et appréhender les résultats dans le cadre d'une étude ONEMA.

Objectif Maine et Loire (Elus agriculteurs et chambre d'agriculture)

Faire connaître les réalisations du département : boues activées plus stockage, en lien avec l'activité réglementaire (5 installations de réutilisation des eaux usées et 2 en projet).

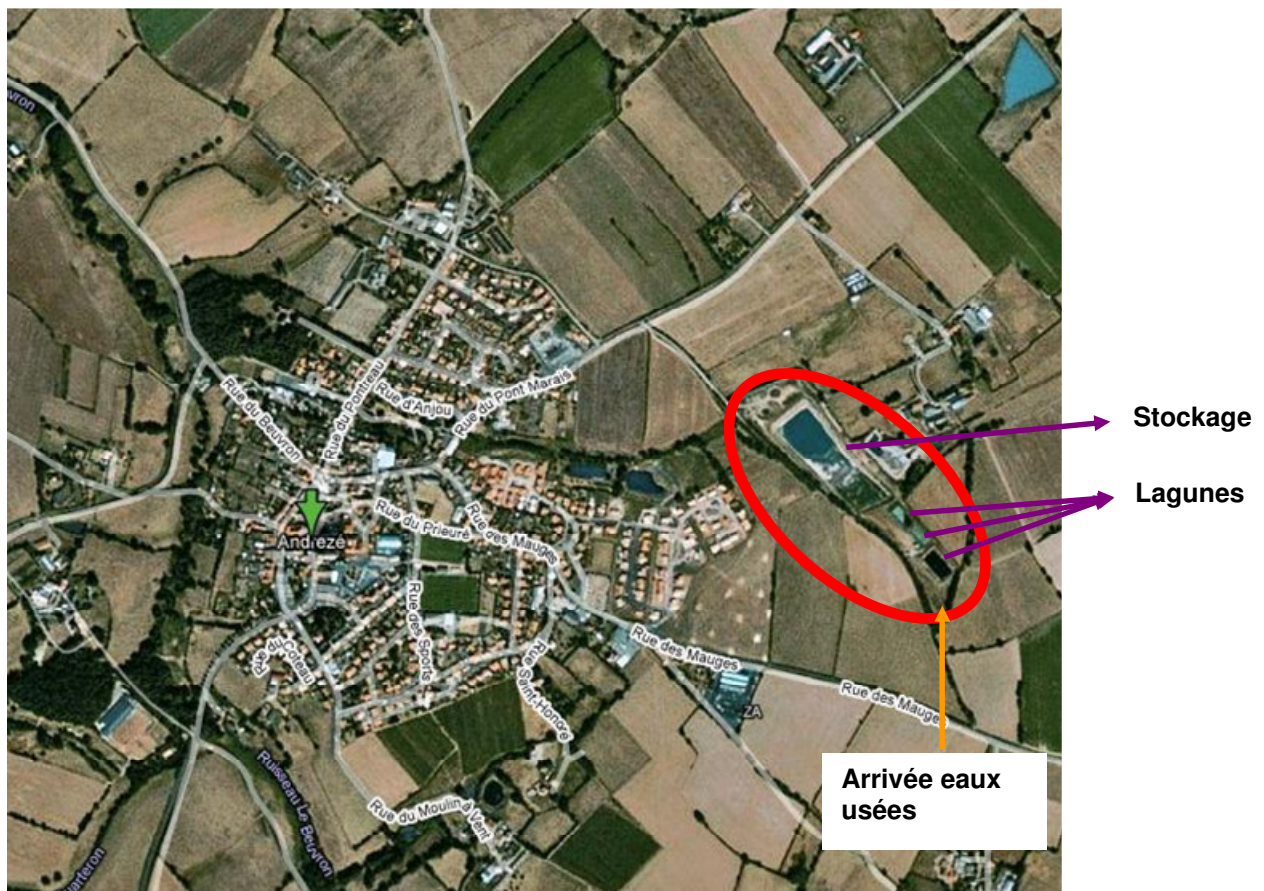
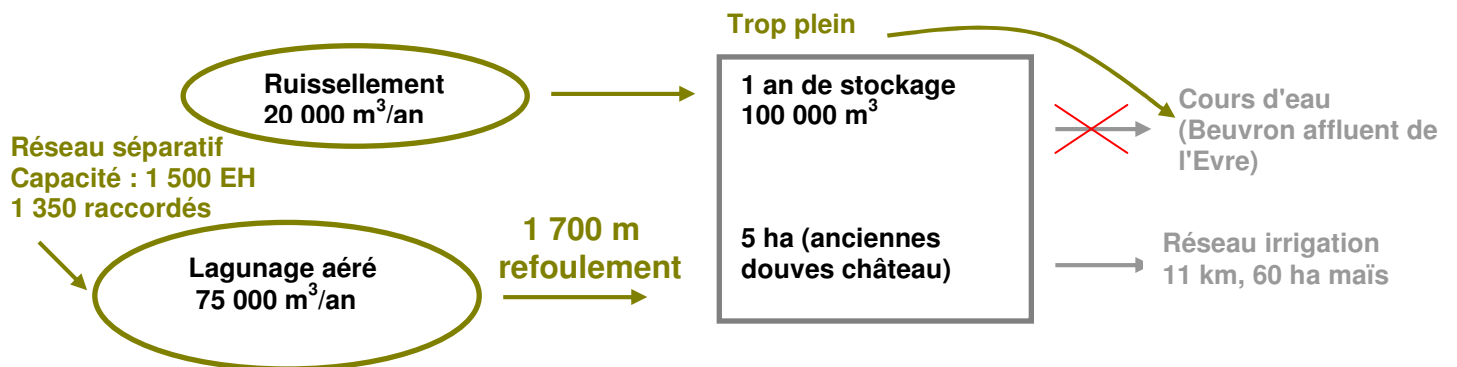
Maine et Loire / contexte

Sur le massif armoricain, le sol est limoneux argileux à argileux en profondeur. Les propriétés du sol ont été utilisées pour créer des retenues de stockage et lagunage étanchées naturellement. Cette imperméabilité joue un rôle dans le manque de ressources en eau dans les secteurs visités. L'eau distribuée provient principalement de la Loire. L'application de la loi sur l'eau de 1992 oriente vers l'arrêt des pompages en rivières pour l'irrigation et le renforcement des niveaux de traitement des eaux usées. Cela conduit à préconiser fréquemment des seuils de qualité stricts en période d'étiage ; de ce fait, la police de l'eau cherche toutes solutions techniques permettant de réduire les flux résiduels de pollution, en période d'étiage tout du moins.

Les eaux usées traitées permettent principalement l'irrigation du maïs d'ensilage. Il existe encore quelques forages individuels de faibles débits, voués à disparaître sous la pression réglementaire.

Dans ce département, le lagunage de type aéré est souvent utilisé comme filière de traitement des eaux usées domestiques.

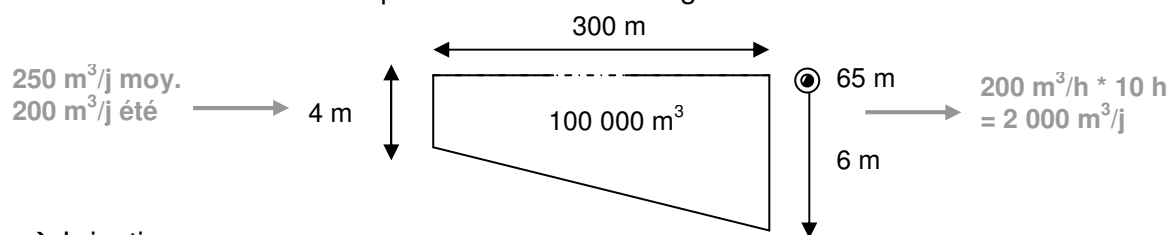
Andrezé : réalisation automne 1997



→ Critères de motivation du projet :

- Station sous dimensionnée à reconstruire, boues à évacuer, plan d'épandage à refaire si boues activées, investissement identique à boues activées du fait du refoulement + stockage.
- Forte demande agricole pour trouver des réserves d'eau d'irrigation, 7 agriculteurs motivés au départ, puis frein Crofeld jacob, nouvelle dynamique en 1995, redémarrage du projet 1996.
- Faible débit d'étiage obligeant à des niveaux de traitement élevés ou stockage > 50 000 m³/an.
- Cours d'eau récepteur : pas de rejet. Le bassin versant en zone sensible vis à vis du phosphore aurait obligé à la mise en place de filière de traitement très performante et plus onéreuse en investissement et exploitation.

- Avantage économique pour les agriculteurs. 5 agriculteurs se sont regroupés en Association Syndicale Libre d'irrigation (ASL) et gèrent par ce biais leurs quotas respectifs de distribution. Le coût d'exploitation après travaux 0,33 € est inférieur au coût moyen de pompes individuels. 80 % des agriculteurs irrigants avec les eaux traitées ont augmenté leur activité suite à la création des bassins et la mise en place du matériel d'irrigation.
- Coût total du projet : environ 800 000 € HT dont :
- 200 000 = refoulement + lagunes
 - 200 000 = stockage
 - 400 000 = pompage irrigation à la charge de l'ASL (hors matériel personnel dont les enrouleurs)
- Bassin versant
- Cholet est en tête du bassin versant, Andrezé en milieu de bassin.
- Système de traitement : lagunage aéré
- Trois bassins : bassin en tête (5 000 m³) et les deux bassins aval (2 * 1 000 m³) sont en série. Les boues décantées restent stockées dans ce premier bassin qui a fait l'objet d'un curage. Environ 20 cm de boues décantées sont dans le 2^{ème} bassin. Les bassins 2 et 3 ne fonctionnent pas en parallèle mais en série ; cette configuration ne semble pas générer de problèmes.
 - L'étanchéité du bassin de stockage ne serait pas mise en défaut malgré le battement du fait de la ré-humification permanente par la tranche d'eau résiduelle.
- Ruissellement
- Hypothèses hors évaporation : 650 mm/an * coefficient de ruissellement de 0,15 * 20 ha = 18 000 m³/an.
- Bassin de stockage
- La priorité au remplissage est donnée aux eaux issues du lagunage
 - Schéma vue en coupe du bassin de stockage :



→ Irrigation

Débit : 1 200 à 1 500 m³/ha.an soit 90 000 à 120 000 m³/an nécessaires. Toute l'eau stockée est utilisée.

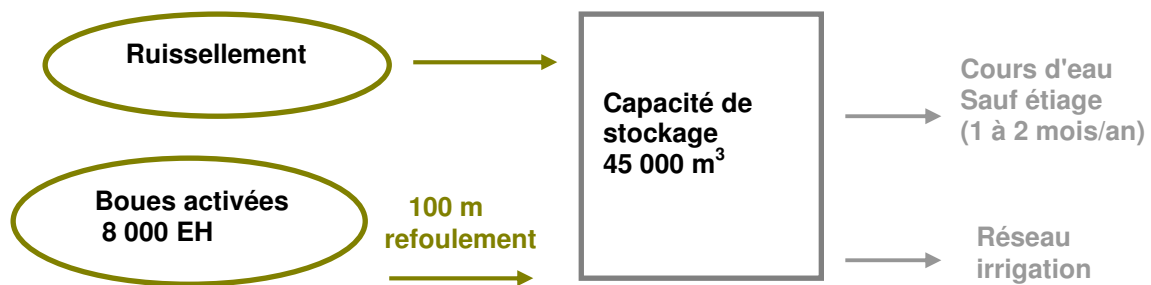
Flux : le bassin de stockage vide, le temps de séjour de l'effluent dans la lagune est encore de 20 à 25 jours.

En considérant une assimilation dans la filière de traitement de l'ordre de 30 % de l'azote et du phosphore, les apports via l'irrigation sont de l'ordre de :

Apport annuel en N : NTK + Nitrates : 10 à 15 mg/L * 125 mm d'irrigation par an soit 15 à 20 kg par hectare.

En P : 2 mg/L soit +/- 4mg/l de P₂O₅ soit 4 à 5 kg de P₂O₅ / hect si 125 mm d'apport d'eau.

Chemillé : réalisation 2003



Critères de motivation du projet :

- Forte demande agricole pour trouver des réserves d'eau d'irrigation (3 agriculteurs). Bonnes synergies agriculteurs-mairie.
- Faible débit d'étiage obligeant à des niveaux de traitement trop élevés, ou interdiction de rejet certains mois de l'année.

→ qualité de l'eau d'irrigation :

2 analyses réalisées par l'ASL (privées) :

en mai : 0 salmonelle 100 mg NO₃ L⁻¹ ce qui laisse à penser que les eaux stockées sont des eaux de ruissellement ;

en septembre : 7 000 UFC / 100 mL les eaux stockées sont des eaux usées traitées par BA

→ Cours d'eau récepteur : Hyrôme

Généralités : Maïs d'ensilage / irrigation

Aspersion tous les 8 à 10 jours environ en cas de sécheresse. Les besoins en apport d'eau d'irrigation sont entre fin juin et début septembre. Pour le maïs, le calcul de demande en eau est établi sur la base de 70 à 80 % des besoins réels soit au final environ 120 à 150 mm /an, soit 1 500 m³ par hectare.

Production de 10 tonnes de matières sèches par hectare en maïs d'ensilage sans irrigation, 16 à 18 tonnes avec irrigation (110 quintaux en grain). Le seuil de rentabilité des exploitations qui demanderait un gain de 5 tonnes à l'hectare pour Andrezé étant dépassé, cela explique l'intérêt des agriculteurs pour investir via l'ASL. La disponibilité de pression constante du dispositif d'aspersion collectif est plus pratique que l'amorçage de pompes individuelles. Des aspersions d'une hauteur de 25 mm suffisent car la couche de terre n'est que de 25 cm avant l'argile.

Les 3 éléments majeurs à prendre en compte pour élaborer un projet de réutilisation sont :

- 3 classes de qualité OMS vis à vis des pathogènes (< 1 000 coliformes fécaux (CF)/100 mL sans restriction irrigation) ;
- 4 classes de qualité en conductivité pour le sol (peptisation^{*21} + salinisation) ;
- Critères de qualité en sodium pour le sol (SAR).

Conclusion

Le contexte pédologique et topographique se prête particulièrement bien à la création de bassins de stockage étanchés naturellement. Les rejets en étiage sont d'autant plus évités que la demande en eau pour l'irrigation est simultanée.

La question de la qualité bactérienne des eaux après lagunage aéré et boues activées puis stockage se pose en lien avec la problématique de la désinfection. Peu de données bactériologiques après un lagunage aéré sont disponibles dans la littérature.

D'après les mesures recueillies, l'abattement des indicateurs après le lagunage aéré puis stockage long serait satisfaisant. Les possibilités de gestion par dilution notamment sur le site de Chemillé semblent représenter un potentiel à mobiliser.

²¹ peptisation = stabilisation par les charges de surface.

ANNEXE D

Bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées traitées

Source : Lazarova et Brissaud, 2007

<i>Intérêt, avantages et bénéfices</i>	<i>Défis et contraintes</i>
1. Ressource alternative - Augmenter la ressource en eau et la flexibilité de l'approvisionnement tout en diminuant la demande globale - Différer le besoin de mobilisation d'autres ressources en eau - Assurer une ressource fiable, disponible et indépendante des sécheresses pour l'irrigation et les usages industriels - Dans certains cas, une exécution rapide et plus facile que la mobilisation de nouvelles ressources en eau de première main - Garantir une indépendance vis-à-vis du fournisseur d'eau potable	1. Aspects législatifs et sanitaires - Problèmes de santé publique liés aux pathogènes éventuels dans les eaux usées non traitées - Absences de réglementation et des incitations à la réutilisation - Droit sur l'eau : qui possède l'eau recyclée et qui récupère les revenus ? - Exploitation inappropriée et/ou qualité non-conforme
2. Préservation des ressources - Economiser l'eau potable pour la préserver aux usages domestiques - Contrôler la surexploitation des ressources souterraines	2. Aspects socio-légaux - Acceptation publique de la réutilisation - Répartition des responsabilités et gestion des litiges
3. Aspects législatifs et sanitaires - Anticiper la compatibilité avec les nouvelles tendances réglementaires - Contribuer au déploiement de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau	3. Aspects économiques - Financement des infrastructures (traitement tertiaire et réseau de distribution) et des coûts d'exploitation - Recouvrement des coûts aléatoire - Demande saisonnière pour l'irrigation et besoin de stockage - « <i>Faible prix</i> » de l'eau potable (subventionnée) surtout pour les agriculteurs - Responsabilité pour la perte potentielle du revenu de la vente d'eau potable
4. Valeur économique ajoutée - Eviter les coûts de développement, du transfert et de pompage de nouvelles ressources en eau fraîche - Dans certains cas, éviter les coûts de l'élimination des nutriments des eaux usées - Réduire ou éliminer l'utilisation d'engrais chimiques en irrigation - Assurer des revenus complémentaires grâce à la vente de l'eau recyclée et des produits dérivés - Assurer des bénéfices économiques pour les usagers grâce à la disponibilité de l'eau recyclée en cas de sécheresse - Favoriser le tourisme dans les régions arides - Augmenter la valeur foncière des terrains irrigués	4. Aspects environnementaux - La présence de beaucoup de sels, bore, sodium et autres micropolluants peut avoir des effets négatifs sur certaines cultures et les sols

<i>Intérêt, avantages et bénéfices</i>	<i>Défis et contraintes</i>
5. Valeur environnementale - Réduire les rejets de nutriments et de polluants dans le milieu récepteur - Améliorer et maintenir les plans d'eau en cas de sécheresse - Éviter les impacts négatifs liés à la construction de nouveaux barrages, réservoirs... - Améliorer le cadre de vie et l'environnement (espaces verts, ...) - Proposer une alternative fiable aux rejets d'eaux usées dans les milieux sensibles (zones de baignade ou conchylicoles, réserves naturelles, ...) - Profiter des nutriments apportés par l'eau d'irrigation pour augmenter la productivité des cultures agricoles et la qualité des espaces verts	5. Aspects technologiques - Une grande fiabilité d'exploitation est requise - Importance du choix de la filière de traitement
6. Développement durable - Réduire les coûts énergétiques et environnementaux par rapport à ceux de l'exploitation des aquifères profonds, du transport d'eau à longues distances, du dessalement, ... - Assurer une ressource alternative à faible coût pour les régions arides, la protection des milieux sensibles et la restauration des zones humides - Augmenter la production alimentaire en cas d'irrigation	

ANNEXE E

Caractéristiques de quelques micropolluants métalliques

source : Gérin et al., 2003

Le **plomb** entraîne une altération de la synthèse de l'hémoglobine au niveau de la moelle osseuse et une perturbation de la fabrication des globules rouges (anémie). Chez la femme enceinte, une exposition au plomb augmente les risques d'avortement et pourrait perturber le développement du fœtus. Le plomb est également neurotoxique et hépatotoxique²². Une exposition aiguë entraîne des troubles neuropsychiques et des douleurs abdominales. Une exposition chronique (saturnisme) atteint le système nerveux central, le système nerveux périphérique, la moelle osseuse et le sang, et provoque une hypertension artérielle. Les enfants sont particulièrement vulnérables. Il y a trois voies de contamination : par inhalation, par ingestion ou par contact cutané.

L'**arsenic** est un poison inodore et incolore très puissant. Il est classé parmi les cancérogènes par le CIRC²³. Il peut provoquer des cancers de la peau, des poumons, de la vessie. Une exposition aiguë entraîne une diminution de la conductivité des nerfs moteurs. Une exposition chronique provoque une anoxie, un affaiblissement de la motricité des mains ou des pieds, une neuropathie. Son origine est la plupart du temps naturelle : l'arsenic se trouve dans le sol et par conséquent dans les aquifères correspondants. L'exploitation minière peut entraîner des contaminations de nappes. L'arsenic peut être absorbé par ingestion, par inhalation ou par contact avec la peau.

Le **mercure** est également un dangereux poison qui se trouve dans l'environnement sous des formes diverses : le mercure métallique n'est pas toxique en phase solide, mais l'est en phase gazeuse ; sous sa forme organique, ou méthylmercure, le mercure est très toxique et concerne la population générale car la contamination a lieu par l'alimentation. C'est un immunosuppresseur, un néphrotoxique²⁴ et un hématotoxique²⁵. Il peut s'accumuler dans les organismes vivants et contaminer toute la chaîne alimentaire. Ce fut le cas par exemple dans la baie de Minamata (Japon) entre 1960 et 1990 : des pêcheurs et leurs familles ont été gravement intoxiqués en consommant des poissons contaminés par des rejets industriels contenant du méthylmercure : 50 décès sont directement liés à cette contamination et il y a aujourd'hui plus de 10 000 personnes affectées, à des degrés différents (malformations congénitales, troubles de l'équilibre et du langage...). Les autres voies de contamination sont l'inhalation et le contact cutané. Les symptômes d'une exposition à long terme sont une excitation anormale, des tremblements de la tête, des mains et des mâchoires et un dysfonctionnement du système nerveux.

L'exposition au **cadmium** peut se faire par inhalation ou par ingestion d'eau et d'aliments contaminés. Le cadmium est classé parmi les produits cancérogènes pour l'humain par le CIRC. Il provoque le cancer des poumons, et il est soupçonné de provoquer celui des reins et de la prostate. L'exposition aiguë entraîne une somnolence, une perte des réflexes et une paralysie respiratoire. Une exposition chronique entraîne des troubles moteurs et des douleurs osseuses.

²² Toxique pour le foie

²³ CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

²⁴ Toxique pour les reins

²⁵ Toxique pour le sang

Enfin, le **nickel** provoque des inflammations des muqueuses et des voies respiratoires. Les voies de contamination principales sont la consommation d'eau et de végétaux contaminés. Le nickel et ses dérivés sont classés parmi les produits cancérigènes pour l'humain par le CIRC. Il provoque notamment des cancers du nez, des poumons et de l'estomac.

Aucun texte réglementaire ou à caractère normatif ne vise le paramètre « éléments traces minéraux » en eaux utilisées pour l'irrigation ou l'arrosage des cultures (CSHPF, 1991). Cependant, un tableau de recommandations (Pratt, 1972 cité dans CSHPF, 1991) est fréquemment cité dans la bibliographie. Voici son adaptation (*tableau E-1*).

Tableau E-1 : Concentrations maximales²⁶ en éléments traces minéraux recommandées dans les eaux d'irrigation

Elément	Concentration maximum recommandée (µg/L)	Remarques
Al (Aluminium)	500	Peut entraîner une non-productivité si sol acide (pH<5.5) et précipite sur sol basique (pH>7), éliminant toute toxicité
As (Arsenic)	100	Toxicité très variable suivant la culture pratiquée
Be (Beryllium)	100	Toxicité très variable suivant la culture pratiquée
Cd (Cadmium)	10	Toxique pour les haricots, betteraves et les plantes potagères à de faibles concentrations (< 100 µg/L), pouvant s'accumuler dans les plantes et les sols
Co (Cobalt)	50	Toxique pour les plants de tomates, apparemment inactif sur des sols basiques et neutres (pH = 7.0)
Cr (Chrome)	100	N'étant pas reconnu comme indispensable aux végétaux
Cu (Cuivre)	200	Toxique pour beaucoup de plantes à de faibles concentrations (100 - 1 000 µg/L)
F (Fluor)	1 000	Inactivé par des sols basiques ou neutres
Fe (Fer)	5 000	Peut contribuer à l'acidification des sols et la perte en éléments essentiels aux plantes tels que le phosphore ou le molybdène
Li (Lithium)	2 500	Toléré par beaucoup de culture jusqu'à 5 mg/l mais toxique pour les citrons à faible concentration (< 75 µg/L) et est relativement mobile dans les sols
Mn (Manganèse)	200	Toxique pour les cultures sur les sols acides
Mo (Molybdène)	10	Non toxique pour les plantes pour des concentrations « raisonnables »
Ni (Nickel)	200	Toxique pour les plantes à des concentrations comprises entre 500 et 1 000 µg/L mais toxicité pouvant être réduite sur des sols neutres ou basiques
Pb (Plomb)	5 000	Peut inhiber la croissance des végétaux à haute concentration
Se (Sélénium)	20	Toxique pour les plantes à des concentrations (< 25 µg/l) mais indispensable aux animaux à très faible concentration
Sn (Étain) Ti (Titane) W (Tungstène)		Exclus par les plantes
V (Vanadium)	100	Toxique pour les plantes à faible concentration
Zn (Zinc)	2000	Toxique pour les plantes sur une large gamme de concentrations mais toxicité réduite pour des pH > 6.0

source : adapté de l'Académie Nationale des Sciences (1972) et Pratt (1972) cité dans CSHPF (1991)

²⁶ Les concentrations maximales sont basées sur une pratique régulière de l'irrigation (flux de 10 000 m³/ha/an).

ANNEXE F

Caractéristiques de quelques micropolluants organiques

Les micropolluants organiques faisant actuellement l'objet d'importantes études sont les organoétains, les PCB et HAP, les phtalates, les solvants, les alkylphénols, les phénols, les chlorophénols et bromophénols, les diphényléthers bromés, les phytosanitaires, les hormones et les composés pharmaceutiques (pour ne citer qu'eux). Il ne sera développé dans cette annexe que quelques polluants organiques, à savoir les PCB, HAP, phytosanitaires et les substances pharmaceutiques (pollution émergente pour ce dernier exemple).

Les **PCB**, ou PolyChloroBiphényles, sont des dérivés chimiques chlorés plus connus en France sous le nom de pyralènes. Depuis les années 1930, les PCB étaient très utilisés dans l'industrie pour leurs qualités d'isolation électrique, de lubrification et d'inflammabilité. On les retrouvait notamment comme isolants dans les transformateurs électriques et les condensateurs, comme lubrifiants dans les turbines et les pompes ou comme composants d'huiles, de soudures, d'adhésifs, de peintures et de papiers autocopiants. Ils ont cessé d'être produits dans les années 80 et progressivement été retirés de la vente jusqu'en 1987. Ces substances sont peu biodégradables et persistantes dans l'environnement. Elles s'accumulent dans les organismes vivants, le long de la chaîne alimentaire. Concernant les effets sur la santé, une exposition aiguë à forte dose est associée à des irritations de la peau (chloracné). Plus rarement, ont été observés des infections hépatiques, neurologiques, des bronchites chroniques, des maux de tête, des vertiges, des dépressions, des troubles de la mémoire et du sommeil, de la nervosité et de la fatigue, et de l'impuissance. S'agissant des effets chroniques (exposition sur le moyen et le long terme), les PCB présentent divers effets néfastes chez l'animal, notamment toxicité pour la reproduction, immunotoxicité et cancérogénicité. Ils ont été classés en tant que substances probablement cancérogènes pour l'homme. Outre ces possibles effets cancérogènes, les effets chroniques des PCB peuvent être des dommages du foie, des effets sur la reproduction et la croissance ; les effets sur les hormones thyroïdiennes et les conséquences possibles sur le développement du cerveau sont l'objet de discussions à l'heure actuelle.

Les **HAP** ou Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (connus aussi sous le nom d'hydrocarbures aliphatiques halogénés) sont des molécules organiques comportant plusieurs anneaux benzéniques. A l'exception du naphthalène, les HAP sont des composés peu solubles dans l'eau et peu volatils. Les HAP se présentent à l'état pur sous forme de solide ou de liquide plus ou moins visqueux. Les HAP sont des molécules neutres, très réduites et hydrophobes. Les HAP de nature indigène dans le milieu naturel sont formés par l'activité biologique, par l'aromatisation de la matière organique, formés par exemple lors du processus d'humification. Les HAP exogènes sont issus de la migration du pétrole depuis les horizons profonds ou d'origine anthropique, comme le versement accidentel du pétrole et la combustion incomplète de la matière. Les géochimistes distinguent les HAP de source pétrogénique, quand ils sont issus de la combustion des carburants fossiles, ou pyrogéniques, quand les HAP sont formés à des températures élevées, par la combustion incomplète de la matière organique. Ainsi, les principales sources de HAP sont la combustion de carburants fossiles (pétrole ou charbon), les feux de forêts, la production du gaz, les usines de traitement du bois, les gaz d'échappement automobile et l'incinération de déchets. Des effets mutagènes et cancérogènes leurs sont reconnus. Pour citer quelques noms de HAP, on trouve le fluoranthène, le benzo(b)fluoranthène et le benzo(a)pyrène, l'acénaphthène, le phénanthrène, le fluorène ou encore le pyrène.

Les **phytosanitaires**, appelés également pesticides ou produits phytopharmaceutiques, sont des substances chimiques utilisées pour lutter contre les maladies des cultures ou pour désherber. On distingue selon leurs usages les herbicides, les fongicides, les insecticides. On les classe également en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques (organo-chlorés, organo-phosphorés, organo-azotés...). Au total, on dénombre plusieurs centaines de substances actives, dont 500 environ seraient couramment employées. La pollution des eaux par ces produits est liée à leur entraînement par ruissellement ou érosion (contamination des eaux de surface) ou par infiltration (contamination des eaux souterraines).

Parmi les causes de contamination : le lessivage par des pluies entraînant les produits phytosanitaires vers les eaux superficielles et souterraines, l'usage incorrect des substances et des techniques, les déversements « accidentels » (vidange de fonds de cuve, rinçage ou abandon d'emballages de produits phytosanitaires). Le transfert des pesticides vers les rivières et les nappes est influencé par leur solubilité dans l'eau, leur stabilité chimique, la nature du sol et la pluviométrie.

A court terme, les pesticides peuvent être responsables d'intoxications aiguës, liées à une absorption accidentelle, qui se manifestent par des troubles nerveux, digestifs, respiratoires, cardiovasculaires ou musculaires. Lors de contact avec la peau, des symptômes cutanés (dermites...) sont fréquents. A long terme, les pesticides peuvent entraîner des effets toxiques au niveau du système nerveux central et des effets cancérogènes, voire mutagènes. Actuellement plusieurs substances (DDT, lindane, perméthrine...) sont connues comme pouvant perturber le système endocrinien (système hormonal qui régule le développement, la croissance, la reproduction et le comportement des individus).

Tout comme les micropolluants minéraux, il n'existe pas de réglementation ou simplement de recommandations sur les concentrations en éléments traces organiques admissibles dans les eaux usées traitées et réutilisées. A titre d'exemple, on peut citer les concentrations maximales en pesticides fixées par le Code de la Santé Publique (d'après *Ministère de l'écologie et du développement durable*, 2007) :

- pour l'eau brute en milieu naturel :
 - o 2 µg/L pour chaque pesticide ;
 - o 5 µg/L pour le total des substances mesurées ;
- pour l'eau du robinet :
 - o 0,1 µg/L pour chaque pesticide (à l'exception de l'aldrine, la dieldrine, l'heptachlore, l'heptachloroépoxyde : 0,03 µg/l) ;
 - o 0,5 µg/L pour le total des substances mesurées.

Parmi les **substances pharmaceutiques** dans les eaux (usées), on trouve des hormones issues des contraceptifs, des anticancéreux, des anti-inflammatoires, des antibiotiques, du paracétamol, des produits de soins corporels, ... Ils sont sous forme plus ou moins modifiée dans nos urines, les matières fécales, et se retrouvent dans les eaux usées (particuliers et hôpitaux). Les animaux contribuent aussi de manière significative à cette pollution car ce sont eux les plus grands consommateurs au monde de médicaments (par exemple les antibiotiques ou le *Valium* se retrouvent dans les lisiers de porcs qui vont être épandus sur les sols). Certains de ces composés arrivent dégradés dans les stations de traitement des eaux usées, d'autres sous leur forme initiale. Ces molécules se modifient dans l'eau et les produits de cette dégradation sont parfois plus toxiques que la molécule initiale. Les effets de cette pollution médicamenteuse sur l'environnement sont connus depuis 2003, avec une « féminisation des poissons » : les mâles sont en complète régression, les femelles sont très largement majoritaires, et parfois les seules occupantes des eaux des fleuves. Leurs graisses sont « gorgées » de pesticides et surtout d'hormones de synthèse (contraceptifs oraux). Ces mutations concernent d'ailleurs la plupart des espèces : les phoques dans le Waddenzee

néerlandais, les oiseaux piscivores dans l'Escaut occidental, la Plie du canal de la mer du nord, la tanche dans les cours d'eau flamands, la pourpre de l'atlantique, et le buccin de la Mer du Nord et de l'Escaut Oriental... Et en fin de chaîne alimentaire, il y a l'homme, lequel s'en nourrit et accumule à son tour toutes ses substances stérilisantes et féminisantes dans son corps. C'est aussi à cette pollution médicamenteuse que l'on doit les nouvelles résistances à certains antibiotiques, car ces derniers étant de plus en plus présents dans la nature, deviennent de moins en moins efficaces chez l'homme.

ANNEXE G

Concentrations médianes (maximales) de produits pharmaceutiques et de produits de soins corporels (PPCP) issus de la surveillance des eaux de rivière, des eaux usées avant et après traitement (en ng/L)

Source : Ternes et al., 2005

Produit	Point de prélèvement	Allemagne^a	Autriche	Pologne	Espagne	France	Suisse	Finlande
Diclofenac	Eau d'entrée STEU	3 500 (28 000)	3 100 (6 000)	1 750 (2 000)	n.d	n.a	1 400 (1 900)	350 (480)
	Eau sortie STEU	810 (2 100)	1 500 (2 000)	n.a	n.d	295 (300)	950 (1 140)	250 (350)
	Rivière	150 (1 200)	20 (64)	n.a	n.d	18 (41)	20-150	15 (40)
Ibuprofène	Eau d'entrée STEU	5 000 (14 000)	1 500 (7 200)	2 250 (2 800)	2 750 (5 700)	n.a	1 980 (3 480)	13 000 (19 600)
	Eau sortie STEU	370 (3 400)	22 (2 400)	n.a	970 (2 100)	92 (110)	<50 (228)	1 300 (3 900)
	Rivière	70 (530)	n.d	n.a	n.a	23 (120)	n.d –150	10 (65)
Benzafibrate	Eau d'entrée STEU	4 900 (7 500)	2 565 (8 500)	780 (1 000)	n.d	n.a	n.a	420 (970)
	Eau sortie STEU	2 200 (4 600)	103 (611)	n.a	n.d	96 (190)	n.a	205 (480)
	Rivière	350 (3 100)	20 (160)	n.a	n.a	102 (430)	n.a	5 (25)
Diazépam	Eau d'entrée STEU	< LQ	n.d	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d
	Eau sortie STEU	< LQ (40)	n.d	n.a	n.d	n.d	n.a	n.d
	Rivière	n.d	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.d
Carbamazépine	Eau d'entrée STEU	2 200 (3 000)	912 (2 640)	n.a	n.a	n.a	690 (1 900)	750 (2 000)
	Eau sortie STEU	2 100 (6 300)	960 (1 970)	1 150 (1 600)	n.a	1 050 (1 400)	480 (1 600)	400 (600)
	Rivière	250 (1 100)	75 (294)	n.a	n.a	78 (800)	30-150	70 (370)
Sulfamethoxazole	Eau d'entrée STEU	1 370 (1 700)	n.d (470)	1 550 (2 000)	600	n.a	425 (570) 1 670 (1 900)	n.a
	Eau sortie STEU	400 (2 000)	31 (234)	n.a	250	n.d	290 (860) 400 (880)	n.a
	Rivière	30 (480)	n.d	n.a	n.a	25 (133)	n.a	n.a

Roxithromycine	Eau d'entrée STEU	830 (1 000)	43 (350)	n.d	n.d	n.a	20 (35)	n.a
	Eau sortie STEU	100 (1 000)	66 (290)	n.a	n.d	n.d	15 (30)	n.a
	Rivière	< LQ (560)	n.d	n.a	n.a	9 (37)	n.a	n.a
Iopromide	Eau d'entrée STEU	13 000 (22 000)	n.d (3 840)	1 330 (2 700)	1 330 (2 700)	n.a	810 (7 700)	n.a
	Eau sortie STEU	750 (11 000)	n.d (5 060)	n.d	n.d	n.a	790 (2 000)	n.a
	Rivière	100 (910)	91 (211)	n.a	n.a	7 (17)	n.a	n.a
AHTN ^c	Eau d'entrée STEU	400 (450)	970 (1 400)	n.d	n.d	n.a	545 (940)	200 (230)
	Eau sortie STEU	90 (180)	140 (230)	n.a	n.a	n.a	410 (500)	40 (50)
HHCB ^d	Eau d'entrée STEU	1 500 (1 800)	2 800 (5 800)	610 (1 200)	610 (1 200)	n.a	1 660 (2 200)	750 (980)
	Eau sortie STEU	450 (610)	470 (920)	n.a	n.a	n.a	1 150 (1 720)	120 (160)

(a) : les concentrations pour l'Allemagne sont des moyennes

(b) : inclus le métabolite humain N^d-acetyl-sulfamethoxazole

(c) : 6-acetyl-1,1,2,4,4,7-hexamethyltetralin

(d) : 1,3,4,6,7,8-hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethylcyclopenta(g)-2-benzopyran

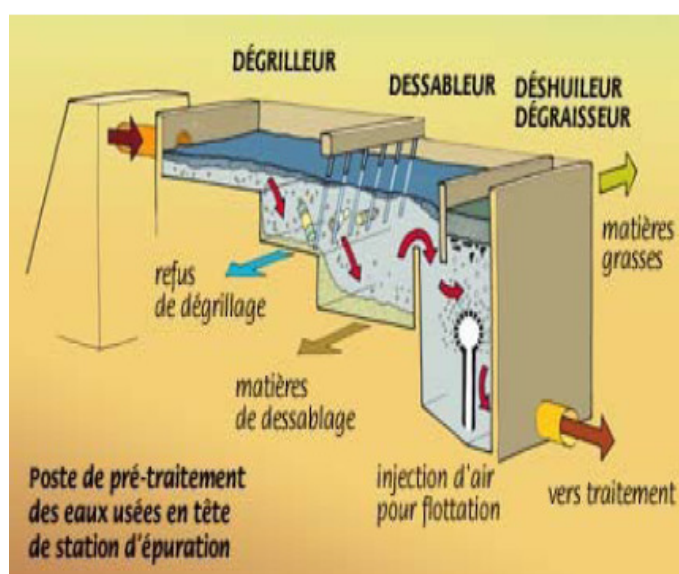
n.a : donnée non acquise ; n.d : non détectable (sous le seuil de quantification) ; LQ : limite de quantification

ANNEXE H

Intérêt des prétraitements et du traitement primaire

Prétraitements

Les prétraitements sont une étape préalable au traitement des effluents urbains. Ils consistent en un traitement physique des effluents afin de protéger les organes électromécaniques et les ouvrages situés à l'aval. Ils se composent de trois ouvrages disposés en série : le dégrilleur, le dessableur et le déshuileur qui permettent de se débarrasser, dans l'ordre chronologique, des déchets volumineux, des sables et des graisses contenus dans les eaux usées (*figure H-1*).



source : Naud (2006)

Figure H-1 : Agencement des prétraitements en station de traitement des eaux usées

Ces dispositifs n'ont pas vraiment de capacités de traitement mais plutôt de protection des ouvrages en aval et de préparation au « véritable » traitement de l'eau usée. Les rendements obtenus sur les paramètres tels que DBO₅ et MES sont très faibles (de l'ordre de 2 % d'après Canler *et al.*, 2004) : ils ne sont donc pas considérés dans le cas d'une eau résiduaire urbaine. Le volet entretien ne sera pas abordé car il n'apporte pas d'éléments pertinents dans le cadre de cette étude. La prochaine étape d'épuration d'une eau usée est le traitement primaire. Il permet d'éliminer efficacement les MES et une partie de la pollution carbonée contenues dans les eaux usées.

Traitement primaire

Lorsqu'il est nécessaire, le traitement primaire permet d'éliminer les matières particulaires (essentiellement les MES) par des procédés physiques ou physico-chimiques. Parmi les technologies habituellement rencontrées à ce stade de l'épuration, on trouve la fosse septique toutes eaux (notée FS), le décanteur-digester (noté D-D), le décanteur primaire (noté DP) pour les procédés physiques et la coagulation-floculation-décantation primaire (notée CF-DP) en tant que procédé physico-chimique. Le tamisage peut aussi faire partie du traitement primaire : il s'agit d'une filtration retenant les matières solides sur toile métallique, treillis ou tôle perforée.

Le *tableau H-1* reprend une à une les techniques citées (nommées dans le tableau par leurs acronymes), à l'exception du tamisage.

Tableau H-1 : Techniques les plus répandues en traitement primaire

	FS	D-D	DP	CF-DP
Principe	Permet un traitement préliminaire en assurant à la fois une fonction physique (rétenction des matières solides) et une fonction biologique (liquéfaction des matières solides retenues dans la fosse)	Assure le dépôt des particules en suspension contenues dans les eaux usées préalablement traitées par simple séparation gravitaire et la digestion anaérobie de la fraction organique de ces dépôts progressivement accumulés	Assure le dépôt des particules en suspension contenues dans les eaux usées préalablement traitées par simple séparation gravitaire	- Addition d'un réactif chimique (FeCl_3, AlCl_3...) permettant la déstabilisation des particules colloïdales - Ajout d'un flocculant (polymère...) pour permettre l'agglomération de ces particules - Simple décantation en fin de procédé
Avantages	- Exploitation aisée - Ouvrage non visible - Adapté aux très petites collectivités et à l'Assainissement Non Collectif	- Boues stabilisées - Effluent ne devenant pas septique - Exploitation aisée - Peut remplacer un ouvrage de dégraissage - Pour des capacités comprises entre 150 et 1 000 EH²⁷		- Bonne clarification des eaux - Fonctionnement en discontinu possible - Adaptable aux fortes variations hydrauliques
Inconvénients	- A associer obligatoirement avec une culture fixée sur support fin - Risques d'odeurs - Effluent septique - Entretien délicat	- Ouvrage de grande hauteur - Peu esthétique - Risque d'odeurs - Sensible aux variations hydrauliques		- Production importante de boues - Augmentation de la salinité - Consommation importante de produits chimiques
Source	<i>Alexandre et al., 1997, FNDAE n°22</i>	<i>Alexandre et al., 1997 FNDAE n°22</i>		

Les trois ouvrages « fosse septique toutes eaux », « décanteur-digester » et « décanteur primaire » sont supposés avoir les mêmes efficacités sur les paramètres DBO_5 , DCO et MES. Le procédé physico-chimique est probablement le plus efficace sur ces points. Concernant la microbiologie des eaux, le peu de données ne permet pas d'être précis et engage juste à quelques suppositions. Quelques rendements sur les microéléments minéraux figurent également. Voici les résultats qu'on peut espérer atteindre (*tableau H-2*).

²⁷ La directive européenne du 21 mai 1991, "relative au traitement des eaux urbaines résiduaires", donne comme définition de l'Equivalent Habitant (EH), une charge organique biodégradable ayant une DBO_5 de 60 grammes d'oxygène par jour.

Tableau H-2 : Efficacité « attendue » du traitement primaire (%)

	FS	D - D	DP	CG - DP
DBO ₅	30			65 – 80
DCO	30			65 – 80
MES	50			85 – 95
PO ₄ ³⁻				70 – 95 ***
Lipides				80 – 95
Coliformes fécaux	Probablement identique que pour DP**		0.1 à 0.3 u.log	Probablement plus important que pour DP**
Kystes et oocystes de protozoaires*			0 à 1 u.log	
Œufs d'helminthes			0.3 à 1.7 u.log	
Virus			< 0.1 u.log	
Micropolluants minéraux				
Baryum			59	47
Bore			4	11
Cadmium			83	82
Chrome			90	89
Cobalt			39	18
Cuivre			83	81
Etain			82	87
Molybdène			39	29
Nickel			52	19
Plomb			90	90
Rubidium			4	5
Sélénium			58	58
Titane			76	91
Zinc			83	82

* : représentés par *Cryptosporidium parvum*, *Entamoeba histolytica* et *Giardia lamblia*

** : selon Seira, 2008

*** : pour atteindre ces efficacités, l'effluent doit être débarrassée de la majorité des MES

Source : Alexandre et al. (1997) pour les paramètres DBO₅, DCO, MES ; Asano et al. (2007) pour les paramètres microbiologiques et Pomiès (2008) pour les micropolluants minéraux

Les résultats concernant la microbiologie sont assez contrastés mais semblent indiquer que les œufs d'helminthes peuvent être légèrement éliminés par ce traitement. On peut supposer que la coagulation-floculation est relativement efficace sur les microorganismes par piégeage lors de la formation des floes. Concernant les micropolluants métalliques, certains semblent mieux retenus que d'autres et on peut supposer que leurs adsorptions sur les MES sont à l'origine de leur élimination.

ANNEXE I

Modèle proposé par AQUAREC

L'une des préconisations issues du programme de recherche d'AQUAREC consiste en l'élaboration d'une chaîne logique de constituants en fonction de la nature des eaux usées à traiter (Tableaux I-1 à I-4).

Tableau I-1 : Différentes technologies en REUT proposées par AQUAREC

Prétraitement		Traitement tertiaire	
001	Dégrillage grossier	301	Filtration sur milieu fin poreux
002	Dessablage	302	Filtration en surface
003	Dégrillage moyen	303	Microfiltration
Traitement primaire		304	Ultrafiltration
101	Tamissage	305	Nanofiltration
102	Décantation avec/ou coagulation	306	Osmose Inverse
103	Décantation avec coagulation	307	Charbon Actif en Grains
104	Flottation à l'air dissous avec coagulant	308	Charbon Actif en Poudre
105	Filtration membranaire	309	Echange d'ion
106	Actiflo®	310	Oxydation avancée : UV/Ozone
107	Lagunes anaérobies	311	Oxydation avancée : UV/H ₂ O ₂
Traitement secondaire		312	Traitement par le sol
201	Boues activées haute charge + décantation secondaire	313	Lagunes de maturation
202	Boues activées faible charge avec ou sans élimination de l'azote + décantation secondaire	314	Bassin artificiel : finition
203	Boues activées faible charge avec élimination de l'azote + décantation secondaire	315	Floculation
204	Lit bactérien + décantation secondaire	Désinfection	
205	Disques biologiques	401	Ozone
206	Filtre aéré immergé	402	Acide peracétique
207	Lagunes aérobies	403	Bioxyde de chlore
208	Lagunes aérées	404	Chlore gazeux
209	Lagunes facultatives	405	UV
210	Bassin artificiel : écoulement de surface		
211	Bassin artificiel : écoulement souterrain		
212	Bioréacteur à membranes		
213	Élimination biologique du phosphore		
214	Précipitation chimique du phosphore		

Tableau I-2 : Combinaisons possibles à partir d'un effluent brut

Depuis un effluent brut	
Usage	Combinaisons possibles (/ = ou ; + = et)
Industrie	001/003,002,101,212,(304),305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,202/204/205/206,(315+301/302),315+303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,202/204/205/206,315+301/302,307/308,310/311,(309),(401/405) ou 001/003,002,102/103/104/106,203+214,(315+301/302),(315+)303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,213,(315+301/302),(315+)303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,101/102,105,(315+)304,305/306,401/405
Potable	001/003,002,101,212,(304),305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,202/204/205/206,(315+301/302),315+303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,202/204/205/206,315+301/302,307/308,310/311,(309),(401/405) ou 001/003,002,102/103/104/106,203+214,(315+301/302),(315+)303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,102/103/104/106,213,(315+301/302),(315+)303/304,305/306,401/405 ou 001/003,002,101/102,105,(315+)304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Urbain	1 : 001/003,002,102/103/104/106,202/203(+214)/204/205/206/213,(401/402/403/404/405) ou 001/003,002,101,212,(401/402/403/404/405) ou 001/003,107,208/(209+)207,(401/402/403/404/405) ou 001/003,210/211,(401/402/403/404/405) ou tous ceux précités 2 : 1 avec 212,(304),305/306,401/405 ou 1 avec ou sans 212,(315+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Recharge de nappe	1 : 001/003,002,102/103/104/106,202/203(+214)/204/205/206/213,(401/402/403/404/405) ou 001/003,002,101,212,(401/402/403/404/405) ou 001/003,107,208/(209+)207,(401/402/403/404/405) ou 001/003,210/211,(401/402/403/404/405) ou tous ceux précités 2 : 1 avec 212,(304),305/306,401/405 ou 1 avec ou sans 212,(316,301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Environnemental et récréatif	001/003,002,102/103/104/106,202/203(+214)/204/205/206/213,(312/313/314),(401+402/403/404/405) ou 001/003,002,101,212,(401/402/403/404/405) ou 001/003,107,208/(209+)207,(312/313/314),(401/402/403/404/405) ou 001/003,210/211 ou tous ceux précités
Agriculture	Aucun ou 001/003 ou 001/003,002 ou 001/003,002,101 ou 001/003,002,102/103/104/106/107 ou 001/003,002,101/102,105 ou tous ceux précités

Tableau I-3 : Combinaisons possibles à partir d'un effluent primaire

Depuis un effluent primaire	
Usage	Combinaisons possibles (/ = ou ; + = et)
Industrie	212,(304),305/306,401/405 ou 202/204/205/206,(315+301/302),315+303/304,305/306,401/405 ou 202/204/205/206,316+301/302,307/308,310/311,(309),(401/405) ou 203+214,(315+301/302),(315+)303/304,305/306,401/405 ou 213,(315+301/302),(315+)303/304,305/306,401/405 ou 105,(315+)304,305/306,401/405
Potable	212,(304),305/306,401/405 ou 202/204/205/206,(315+301/302),315+303/304,305/306,401/405 ou 202/204/205/206,315+301/302,307/308,310/311,(309),(401/405) ou 203+214,(315+301/302),(315+)303/304,305/306,401/405 ou 213,(315+301/302),(315+)303/304,305/306,401/405 ou 105,(315+)304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Urbain	1 : 202/203(+214)/204/205/206/213,(401/402/403/404/405) ou 212,(401/402/403/404/405) ou 107,208/(209+)207,(401/402/403/404/405) ou 210/211,(401/402/403/404/405) ou tous ceux précités 2 : 1 avec 212,(304),305/306,401/405 ou 1 avec ou sans 212,(315+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Recharge de nappe	1 : 202/203(+214)/204/205/206/213,(401/402/403/404/405) ou 212,(401/402/403/404/405) ou 107,208/(209+)207,(401/402/403/404/405) ou 210/211,(401/402/403/404/405) ou tous ceux précités 2 : 1 avec 212,(304),305/306,401/405 ou 1 avec ou sans 212,(315,301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Environnemental et récréatif	202/203(+214)/204/205/206/213,(312/313/314),(401/402/403/404/405) ou 212,(401/402/403/404/405) ou 107,208/(209+)207,(313/313/314),(401/402/403/404/405) ou 210/211 ou tous ceux précités
Agriculture	Aucun ou 107 ou 105 ou tous ceux précités

Tableau I-4 : Combinaisons possibles à partir d'un effluent secondaire

Depuis un effluent primaire	
Usage	Combinaisons possibles (/ = ou ; + = et)
Industrie	(304),305/306,401/405 ou (316+301/302),316+303/304,305/306,401/405 ou 316+301/302,307/308,310/311(,309)(,401/405) ou (316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou (316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou (316+)304,305/306,401/405
Potable	(304),305/306,401/405 ou (316+301/302),316+303/304,305/306,401/405 ou 316+301/302,307/308,310/311(,309)(,401/405) ou 316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou (316+)304,305/306,401/405 ou tous ceux précités
Urbain	1 : (304),305/306,401/405 ou (316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités 2 : (401/402/403/404/405) ou tous ceux précités
Recharge de nappe	Directe : (304),305/306, 401/405 ou (316+301/302),(316+)303/304,305/306,401/405 ou tous ceux précités Indirecte : (401/402/403/404/405) ou tous ceux précités
Environnemental et récréatif	(313/314/315)(,401/402/403/404/405) ou (401/402/403/404/405) ou (313/314/315)(,401/402/403/404/405)tous ceux précités
Agriculture	Aucun ou tous ceux précités

ANNEXE J

Réglementations européennes et françaises ayant un lien indirect avec la REUT

Réglementation communautaire

La REUT n'est pas explicitement citée dans la réglementation communautaire. Aussi, les paragraphes suivants proposent d'identifier les liens et les conséquences parfois implicites des différentes directives concernant l'usage de la REUT. Ils s'appuient en partie sur le rapport du *Mediterranean Wastewater Reuse Working Group (MED WWR WG)*, 2007, en actualisant les références (Abrogation des directives 75/440/EEC et 78/659/EEC).

➤ *Protection des milieux aquatiques*

La directive du 12 décembre 1991 dite "Nitrates" concerne la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. Son annexe 3 relative aux *"mesures à inclure dans les programmes d'action"* précise que ces mesures doivent intégrer la limitation de l'épandage des fertilisants en intégrant *"les apports de composés azotés provenant des engrais chimiques et autres composés"* et en se conformant aux bonnes pratiques agricoles compte tenu des caractéristiques de la zone vulnérable concernée. Dans ce cadre, la REUT permet une diminution de la masse totale d'engrais apportés sur les bassins versants.

La Directive 2000/60/CE dite "Cadre sur l'Eau"

Le groupe de travail MED WWR WG mentionne notamment que la **recharge artificielle d'aquifère** n'est pas exclue pour la REUT et est encadrée par l'article 11 : *"Les programmes de mesures doivent comprendre des mesures de base" (alinéa 3) (f) "des contrôles, notamment l'obligation d'une autorisation préalable pour la recharge ou l'augmentation artificielle des masses d'eau souterraines. L'eau utilisée peut provenir de toute eau de surface ou eau souterraine, à condition que l'utilisation de la source ne compromette pas la réalisation des objectifs environnementaux fixés pour la source ou pour la masse d'eau souterraine rechargée ou augmentée. Ces contrôles sont périodiquement revus et, le cas échéant, mis à jour."*

La Directive 2006/44/CE dite "Poissons" (abrogeant la 78/659/EEC concernant la qualité des eaux douces ayant besoin d'être protégées ou améliorées pour être aptes à la vie des poissons)

Son article 3 précise : *"La présente directive a pour but de protéger ou d'améliorer la qualité des eaux douces courantes ou stagnantes dans lesquelles vivent ou pourraient vivre, si la pollution était réduite ou éliminée, ..."*. Elle indique en annexe des valeurs guides et des valeurs impératives à respecter in situ. Les rejets carbonés et azotés des stations de traitement des eaux usées peuvent in fine inciter la REUT.

La directive 2006/118/EC dite "Eaux souterraines"

Elle vise l'amélioration de la qualité des eaux souterraines. Les bénéfices dus à la limitation des rejets en cours d'eau du fait de la REUT sont donc à rapprocher des risques liés aux communications de nappes avec les sols irrigués.

➤ *Protection sanitaire*

La Directive 2000/60/CE dite "Cadre sur l'Eau"

L'article 6 renforce la **qualité des eaux souterraines** destinées à la production d'eau potable (zones protégées). L'article 4 renforce l'idée de préserver la qualité des **eaux superficielles** en évitant de dégrader les eaux souterraines.

La directive 2006/118/EC dite "eaux souterraines" et 98/83/EC qualité des eaux destinées à la consommation humaine

Globalement, la directive eaux souterraines met l'accent sur le risque de contamination des nappes et impose des périmètres de protection sur lesquels des mesures sont prises afin que l'eau brute destinée à l'eau potable atteigne bien la qualité demandée par la Directive 98/83/CE relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (Préambule 15). Les bénéfices sanitaires dus à l'absence de rejet en cours d'eau sont donc à rapprocher des risques liés aux communications de nappes avec les sols irrigués.

La Directive 2006/7/CE dite "baignade" oriente vers une amélioration de la qualité des eaux du littoral, pouvant inciter toute alternative au rejet d'effluents dans le milieu (dont la REUT). En effet, la qualité microbiologique demandée sur le nombre impératif d'*Escherichia Coli* a été abaissée de 2 000 à moins de 1 000 UFC pour 100 mL pour les eaux côtières et de transition, pour la qualité "bonne". Les normes françaises précédentes étaient spécifiées par le décret du 7 avril 1981 (modifié par le décret n°91-980 du 20 septembre 1991) qui a repris les dispositions de la directive CEE du 8 décembre 1975

L'article 5.3 de la directive 2006/7/CE précise que les États membres veillent à ce que, à la fin de la saison balnéaire 2015 au plus tard, toutes les eaux de baignade soient au moins de qualité suffisante. Ils prennent les mesures réalistes et proportionnées qu'ils considèrent comme appropriées en vue d'accroître le nombre de zones de baignade dont la qualité est "*excellente*" ou "*bonne*".

La Directive 2006/113/CE dite "Conchylicole"

Elle abroge la Shellfish Water Directive de 79/923/EEC. Elle impose une qualité minimale du milieu pour la consommation des fruits de mer. Le volet bactériologique est directement ciblé. Elle peut également favoriser la réutilisation des eaux usées du fait du choix de l'exutoire.

➤ *Protection des sols*

La **directive 86/278/EEC dite "boues"** et la proposition de directive sols

La REUT peut influencer sur la filière boues via le niveau de traitement et le procédé employé. Dans le cadre d'une approche globale, notamment orientée vers la qualité des sols, les bénéfices dus à la réutilisation doivent être confrontés aux conséquences sur la filière boues. Une augmentation du niveau de qualité pouvant induire une masse de boues supérieure et éventuellement une modification de sa qualité qu'il conviendra d'évaluer selon les dispositifs employés et le niveau de traitement exigé.

Dans le cadre des propositions pour une directive dite « sols », l'aspect boues d'épurations est actuellement en discussions. (Avis du Comité économique et social européen, 2006). Des implications sur la REUT sont probables.

➤ *Gestion équilibrée de la ressource*

La Directive Eaux Résiduaires Urbaines de 91/271/CEE indique en son article 12 que "*les eaux usées traitées sont réutilisées lorsque cela se révèle approprié. Les itinéraires d'évacuation doivent réduire au maximum les effets négatifs sur l'environnement*".

La Directive 2000/60/CE

Le groupe de travail MED WWR WG mentionne notamment que :

- l'article 5 de la directive est favorable à la réutilisation du fait d'une réflexion à l'échelle du bassin avec intégration des aspects économiques.
- son annexe VI souligne l'utilité d'une **gestion globale** de l'eau en s'appuyant sur une liste de mesures complémentaires (partie B) à inscrire dans les programmes de mesures des districts hydrographiques, dont l'alinéa x) "*mesures concernant l'efficacité et le recyclage, et notamment promotion des technologies favorisant une utilisation efficace de l'eau dans l'industrie ainsi que de techniques d'irrigation économisant l'eau*".

Réglementation française

➤ *Gestion équilibrée de la ressource*

L'obligation de restitution au milieu des eaux usées n'est pas explicite. Le maintien d'un débit minimal d'étiage concerne les ouvrages ayant prise sur le cours d'eau (Hydro-électriques,...). Le II de l'article L. 211-3 du code de l'environnement impose de "*Délimiter des périmètres à l'intérieur desquels les autorisations de prélèvement d'eau pour l'irrigation sont délivrées à un organisme unique pour le compte de l'ensemble des préleveurs irrigants. Dans les zones de répartition des eaux, l'autorité administrative peut constituer d'office cet organisme*". Le code ne précise pas spécifiquement de quelle manière est encadrée la réutilisation des eaux usées mais la **gestion de la ressource doit être équilibrée** (L. 211-1 du code) pour "*permettre en priorité de satisfaire les exigences de la santé, de la salubrité publique, de la sécurité civile et de l'alimentation en eau potable de la population. Elle doit également permettre de satisfaire ou concilier, lors des différents usages, activités ou travaux, les exigences : 1° De la vie biologique du milieu récepteur, et spécialement de la faune piscicole et conchylicole, 3° De l'agriculture, des pêches et des cultures marines, de la pêche en eau douce, de l'industrie, de la production d'énergie, en particulier pour assurer la sécurité du système électrique, des transports, du tourisme, de la protection des sites, des loisirs et des sports nautiques ainsi que de toutes autres activités humaines légalement exercées*".

➤ *Aspects sanitaires et arrêt temporaire de la REUT*

Outre la circulaire DGS/SD1.1D/92/42 du 3 août 1992 du CSPHP spécifique à la REUT, le "Commentaire technique de l'arrêté du 22 juin 2007" précise : "Par ailleurs, la possibilité d'un rejet en eau superficielle n'exclut en aucun cas la réutilisation qui est souvent d'ailleurs préférable à un rejet en eau superficielle, mais un arrêté devant fixer les conditions de réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation est en préparation ; il devrait être publié en 2008; dans l'attente de sa publication, cette pratique ne peut être autorisée." (Fiche F.3 Dispositif de rejet /b Réutilisation des eaux traitées).

➤ Remarques

1/ Le décret du 2 mai 2006 précise ("*Art. R. 2224-11. - Les eaux entrant dans un système de collecte des eaux usées doivent, sauf dans le cas de situations inhabituelles, notamment de celles dues à de fortes pluies, être soumises à un traitement avant d'être rejetées dans le milieu naturel, dans les conditions fixées aux articles R. 2224-12 à R. 2224-17 ...*")

Le niveau de traitement étant moins exigeant en conditions inhabituelles, des prescriptions complémentaires préfectorales sont nécessaires afin que les conditions sanitaires liées à la REUT soient garanties indépendamment de la pluviométrie.

2/ Le Décret n°2006-503 du 2 mai 2006 précise (Art. 7) "*L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail peut être saisie de tout projet d'assainissement à la demande du préfet.*"

Références réglementaires

Législation européenne et directives en vigueur

86-278 du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement, et notamment des sols, lors de l'utilisation des **boues d'épuration en agriculture**

Avis du Comité économique et social européen sur la "**Proposition de directive** du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des **sols** et modifiant la directive 2004/35/CE"

91/271/CEE du Conseil, du 21 mai 1991, relative au traitement des **eaux urbaines résiduaires**

91/676/CEE du 12/12/91 concernant la protection des eaux contre la pollution par les **nitrates** à partir de sources agricoles

2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un **cadre** pour une politique communautaire dans le domaine de l'**eau** (Eaux de surface 75/440/EEC pour mémoire)

2006/7/CE du parlement européen et du conseil du 15 février 2006 concernant la gestion de la qualité des **eaux de baignade** et abrogeant la directive 76/160/CEE

2006/113/CE du parlement européen et du conseil du 12 décembre 2006 relative à la qualité requise des **eaux conchylicoles**

2006/118/CE du parlement européen et du conseil du 12 décembre 2006 sur la protection des **eaux souterraines** contre la pollution et la détérioration et **98/83/CE** du conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la **consommation humaine**.

2006/44/CE du parlement européen et du conseil du 6 septembre 2006 concernant la qualité des eaux douces ayant besoin d'être protégées ou améliorées pour être aptes à la vie des **poissons** (78/659/EEC pour mémoire)

Entrevue avec S. Breul-Busson, Direction Générale de l'Environnement, Commission Européenne. Workshop Eau dans la ville & assainissement urbain 24 juin 2008, cadre du Forum mondial de l'eau

Législation française

Circulaire DGS/SD1.1D/92/42 du 3 août 1992 du CSPHP

Décret n°2006-503 du 2 mai 2006 relatif à la collecte et au traitement des eaux usées mentionnées aux articles L. 2224-8 et L. 2224-10 du code général des collectivités territoriales

Arrêté du 22 juin 2007 relatif à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées des agglomérations d'assainissement ainsi qu'à la surveillance de leur fonctionnement et de leur efficacité, et aux dispositifs d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique supérieure à 1,2 kg/j de DBO₅

Commentaire technique de l'arrêté du 22 juin 2007

(http://texteau.ecologie.gouv.fr/images/CommTechn20080215_Arr20070622.pdf)

Code de l'environnement Version consolidée au 28 février 2009