

**Observatoire régional de santé d'Ile-de-France
Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France**

Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France

Cette étude a été réalisée à l'ORS Ile-de-France par

Samuel BAUMONT, stagiaire,
École nationale supérieure agronomique de Toulouse (ENSAT),
Jean-Philippe CAMARD, Agnès LEFRANC, chargés d'études à l'ORS et
Antoine FRANCONI, chargé d'études à l'IAURIF

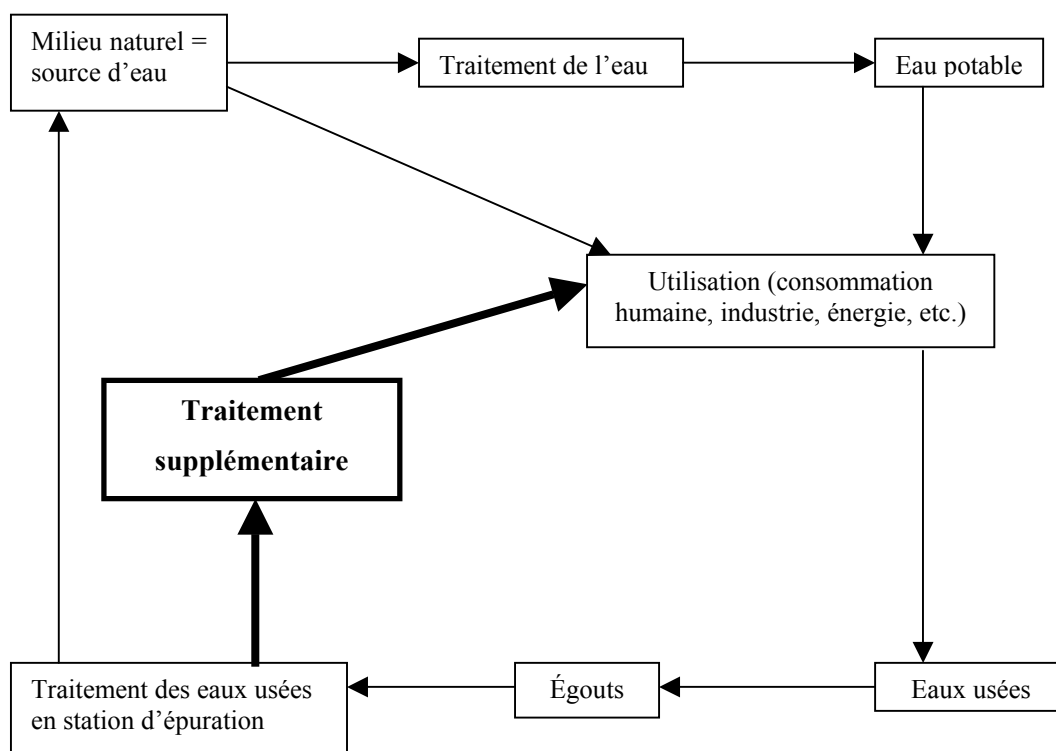
Sommaire

Introduction	5
Composition des eaux usées et dangers associés	9
Origine des eaux entrant en station d'épuration	11
Les eaux usées : un réservoir à polluants	15
Conclusion.....	32
Traitements, stockage et réseau de distribution.....	33
Les différents traitements	35
Analyse de la qualité des eaux après traitement.....	46
Les paramètres physiques, chimiques et microbiologiques	51
Le stockage.....	54
Les problèmes liés au réseau de distribution.....	55
Conclusion.....	56
Aspects techniques et sanitaires	57
Notion de risque	60
La REUE agricole	61
La REUE industrielle	81
La REUE en zone urbaine.....	83
La production d'eau potable.....	88
La recharge de nappe.....	89
Études comparatives des risques en fonction des usages et des traitements	91
Conclusion.....	93
La réglementation.....	95
Les différentes réglementations dans le monde	97
La législation française et les recommandations du CSHPF	109
Conclusion.....	116
Faisabilité en Île-de-France.....	117
Élaboration d'un projet de REUE	119

Évaluation des ressources et des besoins en eau en Île-de-France.....	121
Les différentes pressions sur la qualité des masses d'eau en Île-de-France.....	141
L'état de la filière assainissement en Île-de-France.....	150
Scénarios envisagés.....	159
Autres considérations.....	163
Conclusion.....	165
Bibliographie.....	169
Annexes.....	I

Introduction

Figure 1. La réutilisation des eaux usées épurées (flèches et cadre « en gras ») dans le cycle d'assainissement



La raréfaction des ressources en eau et la dégradation de leur qualité est un défi majeur pour le XXI^e siècle. La France, qui possède des réserves en eau importantes, semble favorisée. Cependant, de même que la plupart des pays industrialisés, elle consomme beaucoup d'eau, et la qualité de ses rivières et de ses nappes phréatiques n'est pas toujours bonne. Afin de préserver la qualité des masses d'eau et pour diminuer les prélèvements dans le milieu naturel, il convient de chercher des approvisionnements alternatifs. La **réutilisation des eaux usées épurées**, ou **REUE**, peut constituer l'un de ces approvisionnements.

La REUE recouvre deux notions complémentaires : le traitement puis la réutilisation proprement dite d'**eaux usées**. Les eaux usées sont les eaux rejetées par les collectivités et les industries et qui sont acheminées par les égouts en station d'épuration afin d'être traitées. Après traitement, on les appelle des **eaux usées épurées**. Dans le cycle d'assainissement de l'eau « classique », celles-ci sont rejetées dans le milieu naturel. La REUE propose de récupérer directement ces eaux usées épurées, de les traiter éventuellement une nouvelle fois et de s'en servir pour toutes sortes d'usages. On constate (figure 1) que la REUE agit à deux niveaux : premièrement elle évite les rejets d'eaux issues de stations d'épuration dans le milieu naturel, et deuxièmement, elle constitue un approvisionnement supplémentaire. En quelque sorte, le cycle d'assainissement de l'eau est « court-circuité ».

Les eaux usées sont fortement chargées en polluants et en contaminants divers, ce qui pose le problème des **risques sanitaires** liés à une REUE et des traitements nécessaires. Le premier objectif de cette étude est de faire une synthèse des connaissances actuelles à ce sujet, et d'en tirer des éléments de conclusion sur la nature et le niveau de ces risques. Le deuxième objectif est, à partir des connaissances théoriques et des expériences de REUE dans le monde et en France, d'estimer **la faisabilité d'un projet de REUE en Île-de-France**, en fonction des risques sanitaires, de la réglementation française et du contexte écologique et économique francilien.

Afin de répondre à ces objectifs, dans une première partie, nous allons analyser la composition des eaux usées et les dangers sanitaires associés. Puis, dans une deuxième partie, nous verrons comment des traitements adéquats permettent de réduire cette charge en polluants. Dans une troisième partie, nous listerons les différents usages possibles, en établissant leurs principales caractéristiques et les risques sanitaires associés. La quatrième partie abordera la question de la législation à l'étranger et en France. Enfin, dans la cinquième partie, à partir de données

spécifiques à l'Île-de-France, nous considérerons les différents usages possibles des eaux usées épurées dans cette région.

Composition des eaux usées et dangers associés

Origine des eaux entrant en station d'épuration

Les eaux usées telles que définies dans l'introduction ont trois origines possibles :

- les eaux domestiques ;
- les eaux industrielles ;
- les eaux de ruissellement.

Les rejets domestiques

Les eaux usées d'origine domestique sont issues de l'utilisation de l'eau (potable dans la majorité des cas) par les particuliers pour satisfaire tous les usages ménagers. Lorsque les habitations sont en zone d'assainissement collectif, les eaux domestiques se retrouvent dans les égouts. On distingue généralement deux « types » d'eaux usées domestiques qui arrivent toutes deux dans le réseau d'assainissement :

- les eaux vannes, qui correspondent aux eaux de toilettes ;
- les eaux grises qui correspondent à tous les autres usages : lave-linge, lave-vaisselle, douche/bain, etc.

La composition des eaux usées d'origine domestique peut être extrêmement variable, et dépend de trois facteurs :

- la composition originelle de l'eau potable, qui elle-même dépend de la composition de l'eau utilisée pour produire l'eau potable, de la qualité du traitement de cette eau, des normes sanitaires du pays concerné, de la nature des canalisations, etc. ;
- les diverses utilisations par les particuliers qui peuvent apporter un nombre quasi-infini de polluants : tous les produits d'entretien, lessives mais aussi, solvants, peintures, mercure de thermomètre, colle, etc.

Tableau 1. Comparaison réseau unitaire et réseau séparatif

Système	Domaine d'utilisation privilégié	Avantages	Inconvénients	Contraintes d'exploitation
Unitaire	<ul style="list-style-type: none"> - milieu récepteur éloigné des points de collecte ; - topographie à faible relief ; - imperméabilisation importante et topographie accentuée de la commune ; - débit d'étiage du cours d'eau récepteur important. 	<ul style="list-style-type: none"> - conception simple : un seul collecteur, un seul branchement par immeuble ; - encombrement réduit du sous-sol ; - <i>a priori</i> économique (dimensionnement moyen imposé par les seules eaux pluviales) ; - aspect traditionnel, dans l'évolution historique des cités ; - pas de risque d'inversion de branchement. 	<ul style="list-style-type: none"> - débit à la station d'épuration très variable ; - lors d'un orage, les eaux usées sont diluées par les eaux pluviales ; - apport de sable important à la station d'épuration ; - acheminement d'un flot de pollution assez important lors des premières pluies après une période sèche ; - rejet direct vers le milieu récepteur du mélange " eaux usées - eaux pluviales " au droit des déversoirs d'orage. 	<ul style="list-style-type: none"> - entretien régulier des déversoirs d'orage et des bassins de stockage ; - difficulté d'évaluation des rejets directs vers le milieu récepteur.
Séparatif	<ul style="list-style-type: none"> - petites et moyennes agglomérations ; - extension des villes ; - faible débit d'étiage du cours d'eau récepteur. 	<ul style="list-style-type: none"> - diminution du diamètre moyen du réseau de collecte des eaux usées ; - exploitation plus facile de la station d'épuration ; - meilleure préservation de l'environnement des flux polluants domestiques ; - certains coûts d'exploitation sont limités (relevage des effluents notamment). 	<ul style="list-style-type: none"> - encombrement important du sous-sol ; - coût d'investissement élevé ; - risque important d'erreur de branchement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Surveillance accrue des branchements ; - entretien d'un linéaire important de collecteurs (eaux usées et pluviales) ; - entretien des ouvrages particuliers (siphons, chasses d'eau, avaloirs) ; - entretien des postes de relèvement et des chambres à sables ; - détection et localisation des anomalies (inversion de branchement, arrivée d'eaux parasites, passage caméra).

Source : Cartel-Eau (cartel.oieau.fr) et Office international de l'eau

- les utilisateurs eux-mêmes qui vont rejeter de la matière organique dans les égouts (urines et fèces) ; la matière organique est le polluant majoritaire des eaux domestiques. Ce type de rejets apporte également des micro-organismes et des contaminants divers (médicaments), etc.

Les rejets industriels

Tous les rejets résultant d'une utilisation de l'eau autre que domestique sont qualifiés de rejets industriels. Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales : blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, etc. L'article L.35-8 du Code de la santé publique précise que le déversement de ces eaux dans les égouts publics n'est pas un droit et doit être préalablement autorisé par la collectivité.

Les rejets industriels peuvent donc suivre trois voies d'assainissement :

- soit ils sont directement rejetés dans le réseau domestique ;
- soit ils sont pré-traités puis rejetés dans le réseau domestique ;
- soit ils sont entièrement traités sur place et rejetés dans le milieu naturel. Ce dernier cas ne nous intéresse pas dans le cadre de la réutilisation des eaux usées épurées.

Dans le cas d'un rejet dans le réseau domestique, avec ou sans pré-traitement, les effluents industriels peuvent fortement modifier la composition des eaux usées. Cette modification est très étroitement liée à l'activité industrielle concernée et peut prendre des formes innombrables.

Eaux de ruissellement

Les eaux de pluie qui ruissellent sur les surfaces imperméabilisées, en général en zone urbaine, sont collectées par un réseau qui peut-être le même que celui qui collecte les eaux usées, ou non. On distingue (cf. tableau 1) :

- les réseaux unitaires : un seul collecteur assure le transport des eaux usées et des eaux pluviales. La qualité et le volume des eaux qui arrivent alors à la station

d'épuration sont très variables. Pour éviter qu'un débit supérieur à sa capacité n'arrive à la station d'épuration, des ouvrages de déviation (réservoirs et déversoirs d'orage) sont répartis sur le réseau ;

- les réseaux séparatifs : deux réseaux sont mis en place, l'un pour collecter les eaux usées, l'autre pour les eaux de ruissellement. En principe seules les eaux usées arrivent à la station d'épuration pour traitement, c'est-à-dire que les eaux de pluie ne sont pas traitées et rejetées directement. La station ne doit donc théoriquement recevoir qu'un effluent brut de qualité relativement régulière et de débit relativement bien déterminé.

Les deux types de réseau présentent des inconvénients et des avantages et sont adaptés à des situations différentes. De manière très générale, les vieux réseaux sont plus souvent des réseaux unitaires : c'est le cas de Paris. Il est souvent très difficile de passer d'un réseau unitaire à un réseau séparatif, à cause des travaux très importants que cela nécessite. Les réseaux séparatifs sont donc plus souvent envisagés pour la construction de nouvelles zones urbaines que pour l'aménagement d'anciens quartiers.

Les eaux de pluie peuvent être récupérées avant d'atteindre le réseau ou le milieu naturel pour être utilisées à des fins diverses : il s'agit d'une utilisation des eaux de pluie (UEP). L'UEP est, au même titre que la REUE, une forme de recyclage de l'eau. Elle ne sera pas abordée plus avant dans cette étude. Cependant, en annexe 1, se trouvent les principaux éléments sur les risques sanitaires de l'utilisation des eaux de pluie et en annexes 2 et 3 une liste d'études scientifiques concernant ce sujet. De plus, la Direction de l'eau et de l'assainissement de la Seine-Saint-Denis (DEA 93) travaille actuellement sur ce thème et s'intéresse notamment à l'état des lieux et la faisabilité en Île-de-France. Ce travail devrait donner lieu à la publication d'un rapport qui pourra servir de référence concernant la UEP en Île-de-France.

Les eaux usées : un réservoir à polluants

La composition des eaux usées est extrêmement variable en fonction de leur origine (industrielle, domestique, etc.). Elles peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute, ainsi que de nombreux micro-organismes. En fonction de leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et du danger sanitaire qu'elles représentent, ces substances peuvent être classées en quatre groupes : les micro-organismes, les matières en suspension, les éléments traces minéraux ou organiques, et les substances nutritives.

Dans cette partie, nous traiterons de manière plus détaillée :

- les **micro-organismes** car ils constituent le principal danger sanitaire pour la réutilisation des eaux usées épurées ;
- les **éléments traces** dont les effets sanitaires à long terme sont moins connus, notamment leur implication potentielle dans la survenue de cancers.

Pour chacune des substances présentes dans les eaux usées, nous allons considérer les modalités de la contamination chez l'homme. Les trois voies de contamination que l'on retrouve classiquement sont :

- la contamination par ingestion : c'est la plus commune. D'une part, il y a l'ingestion directe, lorsqu'il y a consommation d'eau. Celle-ci peut être volontaire lors de la consommation d'eau potable, ou involontaire, par exemple « boire la tasse » en natation. D'autre part, il y a l'ingestion indirecte, par exemple quand les eaux épurées sont utilisées pour irriguer des cultures dont les produits sont ensuite consommés ;
- la contamination par inhalation : elle est moins importante et n'est pas possible pour tous les polluants. Elle se produit lors de la formation d'aérosols, dans le cas de l'irrigation par aspersion ou de l'utilisation d'un karcher ;
- la contamination par voie cutanée : un simple contact peut entraîner une contamination, souvent grâce à des microcoupures sur la peau. Seule la bactérie *Leptospira* est vraiment concernée par ce mode de transmission.

Tableau 2. Les virus dans les eaux usées (pour plus de précisions sur leurs effets pathogènes, cf. annexe 4)

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre d'eau usée	Voies de contamination principales
Virus de l'hépatite A	Hépatite A		Ingestion
Virus de l'hépatite E	Hépatite E		Ingestion
Rotavirus	Vomissement, diarrhée	400 à 85 000	Ingestion
Virus de Norwalk	Vomissement, diarrhée		Ingestion
Adénovirus	Maladie respiratoire, conjonctivite, vomissement, diarrhée		Ingestion
Astrovirus	Vomissement, diarrhée		Ingestion
Calicivirus	Vomissement, diarrhée		Ingestion
Coronavirus	Vomissement, diarrhée		Ingestion / inhalation
Réovirus	Affection respiratoire bénigne et diarrhée		Ingestion
Entérovirus :			
Poliovirus	Paralyse, méningite, fièvre	182 à 492 000	Ingestion
Coxsackie A	Méningite, fièvre, pharyngite, maladie respiratoire		Ingestion
Coxsackie B	Myocardite, anomalie congénitale du cœur (si contamination pendant la grossesse), éruption cutanée, fièvre, méningite, maladie respiratoire		Ingestion
Echovirus	Méningite, encéphalite, maladie respiratoire, rash, diarrhée, fièvre		Ingestion
Entérovirus 68-71	Méningite, encéphalite, maladie respiratoire, conjonctivite hémorragique aiguë, fièvre		Ingestion

Source : adapté d'Asano (1998) et du site Internet du ministère de la Santé du Canada (www.hc-sc.gc.ca)

Quatre « familles » de micro-organismes

Les micro-organismes comprennent, par ordre croissant de taille : les **virus**, les **bactéries**, les **protozoaires** et les **helminthes**. Ils proviennent dans leur immense majorité des matières fécales ; on distingue alors la flore entérique (*i.e.* intestinale) normale et les micro-organismes 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). Le pouvoir pathogène des micro-organismes (ou pathogénicité) dépend de plusieurs facteurs qui sont décrits dans le dernier paragraphe.

Les virus

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nmⁱ) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte. Les virus ne sont pas naturellement présents dans l'intestin, contrairement aux bactéries. Ils sont présents soit intentionnellement (après une vaccination contre la poliomyélite, par exemple), soit chez un individu infecté accidentellement. L'infection se produit par l'ingestion dans la majorité des cas, sauf pour le Coronavirus où elle peut aussi avoir lieu par inhalation. Dans le tableau 2 sont recensés la plupart des virus que l'on peut trouver dans les eaux usées, avec les symptômes de la maladie qui leur est associée, éventuellement le nombre moyen de virus que l'on trouve dans un litre d'eau usée et la voie de contamination principale.

ⁱ nm, nanomètre = 10⁻⁹ m, soit un milliardième de mètre

Tableau 3. Les bactéries pathogènes dans les eaux usées (pour plus de précisions sur leurs effets pathogènes, cf. annexe 4)

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre d'eau usée	Voies de contamination principales
<i>Salmonella</i>	Typhoïde, paratyphoïde, salmonellose	23 à 80 000	Ingestion
<i>Shigella</i>	Dysenterie bacillaire	10 à 10 000	Ingestion
<i>E. coli</i>	Gastro-entérite		Ingestion
<i>Yersinia</i>	Gastro-entérite		Ingestion
<i>Campylobacter</i>	Gastro-entérite	37 000	Ingestion
<i>Vibrio</i>	Choléra	100 à 100 000	Ingestion
<i>Leptospira</i>	Leptospirose		Cutanée/Inhalation/Ingestion
<i>Legionella</i>	Légionellose		Inhalation
<i>Mycobacterium</i>	Tuberculose		Inhalation

Source : adapté d'Asano (1998) et du site Internet du ministère de la Santé du Canada (www.hc-sc.gc.ca)

Les bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 μm^i . La quantité moyenne de bactéries dans les fèces est d'environ 10^{12} bactéries/g (Asano, 1998). La majorité de ces bactéries ne sont pas pathogènes. Cependant, 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, ce qui limitera leur développement.

Les eaux usées contiennent en moyenne 10^7 à 10^8 bactéries/l. La concentration en bactéries pathogènes est de l'ordre de 10^4 /l (Faby, 1997). Le nombre de germes peut être multiplié par 1 000 dans les eaux de rivières après un rejet urbain ; ainsi, à Paris, le nombre de coliformes fécaux passe de 10^3 à 10^6 par millilitre, après la zone de rejet de la station d'épuration d'Achères, qui collecte les eaux usées de la ville (Miquel, 2003).

La voie de contamination majoritaire est l'ingestion, comme le montre le tableau 3. Les bactéries pathogènes d'origine hydrique 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 : ainsi, une inondation au Canada qui avait fait déborder les égouts et souillé le réservoir d'eau potable d'une ville, diffusant alors des bactéries de contamination fécale, a provoqué 400 intoxications dont 5 cas mortels (Miquel, 2003). Une autre situation à risque est liée aux remises en service de canalisations, après un arrêt de plusieurs semaines. Les eaux stagnantes constituent un milieu favorable au développement de films bactériens propices aux contaminations (cas d'une contamination bactérienne des eaux distribuées à Strasbourg, en 2000 ; Miquel, 2003).

ⁱ μm , micromètre = 10^{-6} mètre, soit un millionième de mètre

Tableau 4. Les parasites pathogènes dans les eaux usées

Organisme	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre	Voies de contamination principales
Protozoaires			
<i>Entamoeba histolytica</i>	Dysenterie amibienne	4	Ingestion
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrhée, malabsorption	125 à 100 000	Ingestion
<i>Balantidium coli</i>	Diarrhée bénigne, ulcère du colon	28-52	Ingestion
<i>Cryptosporidium</i>	Diarrhée	0,3 à 122	Ingestion
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose : ganglions, faible fièvre		Inhalation / Ingestion
<i>Cyclospora</i>	Diarrhée, légère fièvre, perte de poids		Ingestion
<i>Microsporidium</i>	Diarrhée		Ingestion
Helminthes			
<i>Ascaris</i>	Ascariadiase : diarrhée, troubles nerveux	5 à 111	Ingestion
<i>Ancylostoma</i>	Anémie	6 à 188	Ingestion / Cutanée
<i>Necator</i>	Anémie		Cutanée
<i>Tænia</i>	Diarrhée, douleurs musculaires		Ingestion de viande mal cuite
<i>Trichuris</i>	Diarrhée, douleur abdominale	10 à 41	Ingestion
<i>Toxocora</i>	Fièvre, douleur abdominale		Ingestion
<i>Strongyloïdes</i>	Diarrhée, douleur abdominale, nausée		Cutanée
<i>Hymenolepis</i>	Nervosité, troubles digestifs, anorexie		Ingestion

Source : adapté d'Asano (1998) et du site Internet du ministère de la Santé du Canada (www.hc-sc.gc.ca)

Les protozoaires

Les **protozoaires** sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. 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 (cf. deuxième partie § 3.2). On peut citer parmi ceux-ci *Entamoeba histolytica*, responsable de la dysenterie amibienne ou encore *Giardia lamblia*.

Les helminthes

Les **helminthes** sont des vers multicellulaires. Tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes **parasites**. Les **œufs d'helminthes** sont très résistants et peuvent notamment survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols ou les plantes cultivées. La concentration en œufs d'helminthes dans les eaux usées est de l'ordre de 10 à 10³ œufs/l (Faby, 1997).

Le tableau 4 regroupe les principaux protozoaires et helminthes que l'on trouve dans les eaux usées, avec les pathologies qui leur sont associées, éventuellement le nombre moyen de parasites que l'on trouve dans un litre d'eau usée et la voie de contamination principale du pathogène.

Tableau 5. Facteurs environnementaux modifiant la survie des micro-organismes

Facteur	Diminution de la survie
Température	Quand elle augmente
Eau	Quand l'humidité diminue
pH	Aux pH extrêmes (>12 ou < 3)
Ensoleillement	Quand la luminosité augmente
Oxygène	Effet variable selon le type respiratoire des bactéries ; effet négatif sur les virus
Matière organique (nutriments)	Quand la quantité de nutriments diminue
Organismes vivants	Quand l'activité biologique augmente. L'activité biologique du milieu (présence d'organismes saprophytes tels que certains champignons) diminue la résistance des organismes par compétition pour les nutriments et sans doute par prédation.

Source : Ademe, 1994

Tableau 6. Temps de survie de pathogènes caractéristiques à 20-30°C

Pathogènes	Temps de survie (jours)		
	Eaux de surface	Sur les plantes	Sur le sol
Virus			
Entérovirus	<120 mais souvent <50	<60 mais souvent <15	<100 mais souvent <20
Bactéries			
Coliformes fécaux	<60 mais souvent <30	<30 mais souvent <15	<70 mais souvent <20
<i>Salmonella</i>	<60 mais souvent <30	<30 mais souvent <15	<70 mais souvent <20
<i>Shigella</i>	<30 mais souvent <10	<10 mais souvent <5	
<i>Vibrio cholerae</i>	<30 mais souvent <10	<5 mais souvent <2	<20 mais souvent <10
Protozoaires			
Kystes d' <i>E. histolytica</i>	<30 mais souvent <10	<10 mais souvent <2	<20 mais souvent <10
Helminthes			
Œufs d' <i>A. lombricoïdes</i>	Plusieurs mois	<60 mais souvent <30	plusieurs mois

Source : Asano (1998), adapté de Faechem (1983)

Les facteurs de la pathogénicité des micro-organismes

Les micro-organismes pathogènes présents dans l'environnement ou dans l'eau ne vont pas toujours déclencher une maladie s'ils sont absorbés. La pathogénicité des micro-organismes dépend de plusieurs facteurs que l'on peut regrouper en deux classes : les facteurs concernant la physiologie du micro-organisme et ceux concernant la physiologie de l'hôte infecté.

La physiologie du micro-organisme

La latence est la durée nécessaire pour qu'un pathogène devienne infectieux. Elle est différente selon les micro-organismes. Elle est nulle pour la majorité des virus, des bactéries et des protozoaires (c'est-à-dire qu'ils sont immédiatement infectieux). Au contraire, la plupart des helminthes ont besoin d'une période de latence, soit que leurs œufs doivent atteindre une certaine maturité, soit que le passage par un organisme hôte non humain soit obligatoire (ex : le bœuf pour le *Tœnia*).

Les micro-organismes pathogènes sont le plus souvent adaptés aux conditions régnant dans le corps humain, c'est pourquoi leur **survie** est souvent limitée à quelques semaines dans le milieu extérieur. Elle dépend à la fois des caractéristiques des micro-organismes (certains sont plus résistants que d'autres) et des conditions du milieu extérieur : pHⁱ, température, ensoleillement, etc. Elles sont exposées dans le tableau 5. Dans des conditions favorables, les pathogènes peuvent survivre plusieurs semaines, voire plusieurs mois sur le sol, sur les plantes ou dans l'eau. Cependant, Cauchi (1996) cite Boutin (1987) qui admet que la plupart des pathogènes (virus, bactéries et protozoaires) ne peuvent pas vivre au-delà de 2 à 3 semaines sur les plantes et au-delà de 3 semaines sur le sol, quand la température est entre 20 et 30°C. Les œufs d'helminthes sont la seule exception : ils peuvent conserver leur viabilité pendant des mois voire des années.

ⁱ On rappelle que le pH peut prendre des valeurs entre 0 et 14. Plus le pH est bas, plus une solution est acide. Quand le pH est haut, la solution est dite basique. La valeur neutre est 7. A titre d'exemples citons le jus de citron : pH=2, le vin : pH=3, le dentifrice : pH = 10.

Tableau 7. Doses minimales infectantes (DMI) moyennes des agents pathogènes présents dans les eaux usées

Micro-organismes	DMI
Virus	10 ²
Bactéries	10 ² -10 ⁶
Helminthes	1-10 ¹
Protozoaires	10 ¹ -10 ²

Source : Cauchi (1996)

Tableau 8. Caractéristiques épidémiologiques de quelques agents pathogènes des eaux usées

Agents	Quantité excrétée / g fèces	Latence	Survie	Multiplication dans l'environnement	Dose infectante (DI 50) ^a
Virus					
Entérovirus	10 ⁷	0	3 mois	Non	< 100
Hépatite A	10 ⁶ ?	0	?	Non	?
Rotavirus	10 ⁶ ?	0	?	Non	?
Bactéries					
Colibacille	10 ⁸	0	3 mois	Oui	± 10 ⁹
<i>Salmonella typhi</i> .	10 ⁸	0	2 mois	Oui	10 ⁷
Autres Salmonelles	10 ⁸	0	2-3 mois	Oui	10 ⁶
<i>Shigella</i>	10 ⁷	0	1 mois	Oui	10 ⁴
Parasites					
Amibe dysent.	10 ⁷	0	25 jours	Non	10 à 100
<i>Giardia lamblia</i>	10 ⁵	0	25 jours	Non	10 à 100
Ascaris	10 ⁴	10 jours	> 1 an	Non	Quelques unités
Tænia	10 ⁴	2 mois	9 mois	Non	1

(a) DI 50 : dose infectante suffisante pour provoquer l'apparition de symptômes cliniques chez 50 % des individus soumis au test.

Source : adapté de Feachem *et coll.* (1983) in Faby (1997)

Pour certains micro-organismes, les conditions du milieu naturel peuvent être non seulement favorables à leur survie, mais également suffisantes pour permettre leur **multiplication**. Tous les micro-organismes ne sont pas aptes à se reproduire dans le milieu extérieur. Les bactéries peuvent se reproduire sur un substrat spécifique ; les helminthes dans leur hôte intermédiaire (ex : bovins et porcins pour le *Tænia*). Quant aux virus et aux protozoaires parasites, ils ne peuvent pas se multiplier en dehors d'une cellule hôte.

La réponse de l'hôte : notion de dose minimale infectante (DMI) et de variabilité interindividuelle

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. Elle varie en fonction des espèces de pathogènes. Elle est difficile à établir car elle nécessite l'utilisation de volontaires humains. Des études expérimentales ont permis de déterminer des DMI avec généralement un mode de transmission par voie orale. Les DMI sont très variables selon le type biologique de l'agent : de l'ordre de l'unité pour les helminthes, de la centaine pour les virus et les protozoaires, elles peuvent dépasser le million pour les bactéries. Associée à leur importante capacité de survie dans le milieu extérieur et à leur émission abondante par les selles, la faible DMI des helminthes en fait des pathogènes particulièrement préoccupants.

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 professionnelle (cf. étude de Clark *et coll.*, 1981, référencée par Devaux, 1999, qui met en évidence que les travailleurs de station d'épuration sont plus résistants que la population générale). C'est la variabilité interindividuelle. Les personnes immunodéprimées sont particulièrement sensibles et la maladie qu'elles vont développer sera plus grave. De même, les enfants et les personnes âgées, sont plus fragiles face aux infections. 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 » (Cauchi, 1996).

Les matières en suspension (MES)

Ce sont des matières biodégradables pour la plupart. **Les micro-organismes sont le plus souvent adsorbés à leur surface et sont ainsi « transportés » par les MES.** Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur. Cependant, elles peuvent avoir un intérêt pour l'irrigation des cultures (cf. troisième partie).

Les micro-polluants organiques et non organiques : une pollution multiple et complexe

Les micro-polluants sont des éléments présents en quantité infinitésimale dans les eaux usées. La voie de contamination principale, dans le cas d'une réutilisation des eaux usées épurées, est l'ingestion. C'est la contamination par voie indirecte qui est généralement préoccupante. Ainsi, certains micro-polluants, comme les **métaux lourds** ou les **pesticides**, peuvent s'accumuler dans les tissus des êtres vivants, et notamment dans les plantes cultivées. Il peut donc y avoir une contamination de la chaîne alimentaire et une concentration de ces polluants dans les organismes. La crispation actuelle de l'opinion publique à leur sujet, et le manque de connaissances sur leurs effets à long terme incite à analyser avec soin la nature et la présence de ces micro-polluants dans les eaux usées.

Les métaux lourds

Les métaux lourds que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux ; les plus abondants (de l'ordre de quelques $\mu\text{g/l}$) sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc.) sont présents à l'état de traces. Leur origine est multiple : ils proviennent « des produits consommés au sens large par la population, de la corrosion des matériaux des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels » (Cauchi, 1996).

Les éléments cités dans la littérature comme étant les plus dangereux sont le plomb (Pb), l'arsenic (As), le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni) (Vilaginès, 2003). Les descriptions suivantes se basent sur une étude synthétique réalisée par Gérin *et al.* (2003).

Le **plomb** est une toxine naturelle. Il 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 hépatotoxique. 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 CIRCⁱ. 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 (Miquel, 2003). 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 (Boudan, 2004). C'est un immunosuppresseur, un néphrotoxique et un hématotoxique. 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, etc.). 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.

ⁱ Centre international de recherche sur le cancer

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 contaminésⁱ. 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. La voie de contamination est principalement l'inhalation.

Parmi les éléments traces se trouvant dans les eaux usées, certains, dits **oligo-éléments**, sont indispensables à la croissance des plantes. Citons entre autres le manganèse, le fer, le cuivre, le molybdène ou encore le zinc. Ils peuvent trouver un intérêt en cas de réutilisation agricole (cf. troisième partie).

Les micro-polluants organiques

Les micro-polluants d'origine organique sont extrêmement **nombreux** et **variés**, ce qui rend difficile l'appréciation de leur dangerosité. Ils proviennent de l'utilisation domestique de détergents, pesticides, solvants, et également des eaux pluviales : eaux de ruissellement sur les terres agricoles, sur le réseau routier, etc. Ils peuvent aussi provenir de rejets industriels quand ceux-ci sont déversés dans les égouts ou même des traitements de désinfections des effluents par le chlore (haloformes). La concentration totale moyenne des micro-polluants d'origine organique dans les eaux usées est de 1 à 10 µg/l (Faby, 1997).

Quelques études mettent plus ou moins en évidence le danger représenté par certains produits, lorsqu'ils contaminent les eaux potables notamment. Ainsi, il a été observé chez des patients exposés au trichloréthylèneⁱⁱ de hauts déficits cognitifs. Ces perturbations du système nerveux central étaient attribuables à l'exposition à ce solvant (White *et coll.*, 1997, *in* Froese, 1998). Chez une population de l'Iowa, exposée à l'herbicide triazine, le taux de retard de croissance intra-utérin était plus élevé que chez les populations témoins. Cependant un lien de causalité direct entre le pesticide et le retard n'a pu être mis en évidence (Munger *et coll.*, 1997, *in* Froese, 1998).

ⁱ Source : www.atmolor.org

ⁱⁱ Molécule organique utilisée par l'industrie comme solvant dans des colles, des peintures, des encres, des teintures, etc.

Concernant les **pesticides**, c'est l'incertitude relative à leur dangerosité chronique qui soulève des inquiétudes. Si en général on connaît les effets d'une intoxication aiguë, la toxicité à long terme et à faible dose est très mal connue. Certaines molécules sont classées comme perturbateurs endocriniens ou cancérogènes possibles par le CIRC. D'autre part, ils ont une forte capacité de **rémanence** (20 ans pour certains) et leur dégradation naturelle produit parfois des métabolites dont les effets sanitaires sont inconnus.

Les pesticides sont les éléments traces les plus surveillés, et une étude d'impact et de métabolisme est obligatoire avant leur mise sur le marché (Miquel, 2003). Par contre, le danger représenté par tous les autres polluants organiques est encore mal apprécié actuellement. Les contrôles de routine ne permettent pas de repérer toutes les toxines. Par ailleurs, on ne connaît rien de la toxicité des mélanges complexes qui peuvent se former par réaction entre les différents contaminants.

Les substances nutritives : potassium, phosphates et nitrates

Leur présence dans les eaux usées peut avoir un impact négatif sur la **santé humaine** et la qualité des **eaux superficielles** et dans une moindre mesure un impact bénéfique sur les **cultures** dans le cas d'une réutilisation agricole.

Le **potassium** est présent dans les effluents secondaires à hauteur de 10 à 30 mg/l (Faby, 1997). Il peut donc couvrir une partie des besoins des plantes.

Les **phosphates** sont présents dans les effluents secondaires à hauteur de 6 à 15 mg/l (Faby, 1997). Cette quantité est en général trop faible pour modifier le rendement, et en cas d'excès, les phosphates se fixent dans le sol. Ils peuvent alors être entraînés par l'érosion et participer au phénomène **d'eutrophisation**.

Les **nitrates**, qui permettent de fournir de l'azote à la plante, sont les plus problématiques. En effet, apportés en excès, ils peuvent avoir plusieurs impacts négatifs :

- sur les cultures : ils entraînent des retards de maturation, une altération de la qualité, etc.
- sur le milieu naturel : les nitrates sont les principaux responsables de l'eutrophisation des milieux aquatiques ;
- sur la santé humaine : les nitrates peuvent être à l'origine de la formation de nitrites et de nitrosamines, responsables de deux phénomènes potentiellement pathologiques : la méthémoglobinémie et un risque de cancer. Les nitrites sont de puissants oxydants qui ont la capacité de transformer l'hémoglobine en méthémoglobine, rendant le sang incapable de transporter l'oxygène jusqu'aux tissus. Les nourrissons de moins de 6 mois représentent une population à risque.

Aujourd'hui, il n'y a pas de preuves concluantes d'un effet cancérigène des nitrates sur l'homme, dans la mesure où les résultats de différentes études épidémiologiques sont non concordants. En revanche, de tels effets ont été observés chez de nombreuses espèces animales (Miquel, 2003). La valeur maximale autorisée dans l'eau de consommation est actuellement de 50 mg/l de nitrates, tolérée jusqu'à 100 mg/l sauf pour les femmes enceintes et les nourrissons. L'eau est interdite de consommation au-delà de ce seuil. L'alimentation est la seule voie d'exposition, majoritairement par la consommation de végétaux (70 % des apports) et non par l'eau (30 %).

Conclusion

Compte-tenu des éléments présents dans les eaux usées, la réutilisation d'une eau de mauvaise qualité peut présenter des risques pour la santé et l'environnement, et poser des problèmes d'ordre technique en bouchant les conduites et les systèmes d'irrigation par exemple. D'un point de vue sanitaire, la quantité de contaminants qui parvient dans l'environnement se nomme la charge excrétée. Sa composition dépend de la population à l'origine de la production des eaux usées, et notamment de la proportion d'individus infectés et des conditions d'hygiène. Elle peut être considérablement réduite par un traitement adéquat. Ce dernier est donc impératif dans le cas d'une REUE.

Traitements, stockage et réseau de distribution

Les différents traitements

On distinguera les **traitements « classiques »** largement utilisés par les stations d'épuration, et les **traitements supplémentaires**, le plus souvent de désinfection, nécessaires pour un projet de REUE. Ces derniers sont communément utilisés dans les stations de traitement qui produisent de l'eau potable. On peut considérer que les installations de traitement nécessaires pour une REUE sont l'association des techniques de l'épuration et de celles de la potabilisation.

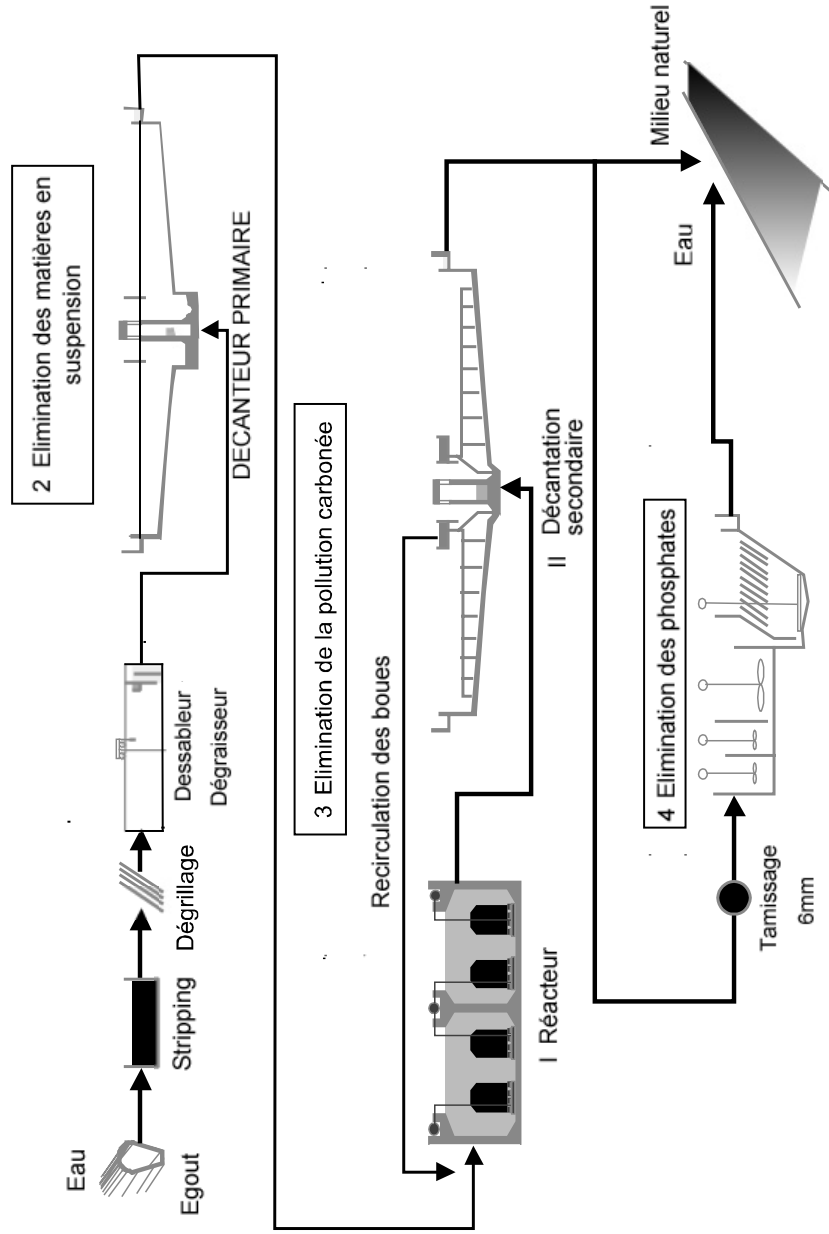
Les traitements sont la première barrière contre les risques posés par les contaminants. Ils vont permettre de réduire considérablement la charge excrétée dans l'environnement. Pour évaluer leurs effets sur les contaminants, nous allons d'une part étudier l'efficacité spécifique de chacun d'entre eux et d'autre part nous présenterons des analyses d'eaux usées épurées.

Lors des traitements, l'élimination des micro-organismes pathogènes a lieu selon trois mécanismes :

- la décantation des MES (sachant qu'une majorité des micro-organismes s'y trouve) ;
- la compétition avec les micro-organismes non pathogènes (pour les traitements biologiques) ;
- l'action physico-chimique des procédés de désinfection et des facteurs naturels (lumière, température).

La plupart des éléments traces sont peu solubles, leur élimination a donc lieu par décantation principalement. Leur concentration dans les eaux usées étant *a priori* peu préoccupante, ils ont été moins étudiés que les micro-organismes.

Figure 2. Schéma général d'une station d'épuration. Usine Seine Amont © Siaap, 2002



Les traitements « classiques »

Une station d'épuration comporte généralement une phase de prétraitement, pendant laquelle les éléments les plus grossiers sont éliminés par dégrillage (pour les solides de grandes tailles), puis par flottaison/décantation (pour les sables et les graisses). Vient ensuite un traitement dit primaire, une décantation plus longue, pour éliminer une partie des MES. Des traitements physico-chimiques et/ou biologiques sont ensuite appliqués, afin d'éliminer la matière organique (*i.e.* matière carbonée). Ils sont généralement suivis d'une phase de clarification qui est encore une décantation. Enfin, un traitement des nitrates et des phosphates est exigé en fonction de la sensibilité du milieu récepteur (cf. figure 2 : la station d'Achères). Il existe également des traitements dits extensifs, comme le lagunage, qui combinent des traitements biologiques, physiques et naturels.

Les traitements physiques par décantation

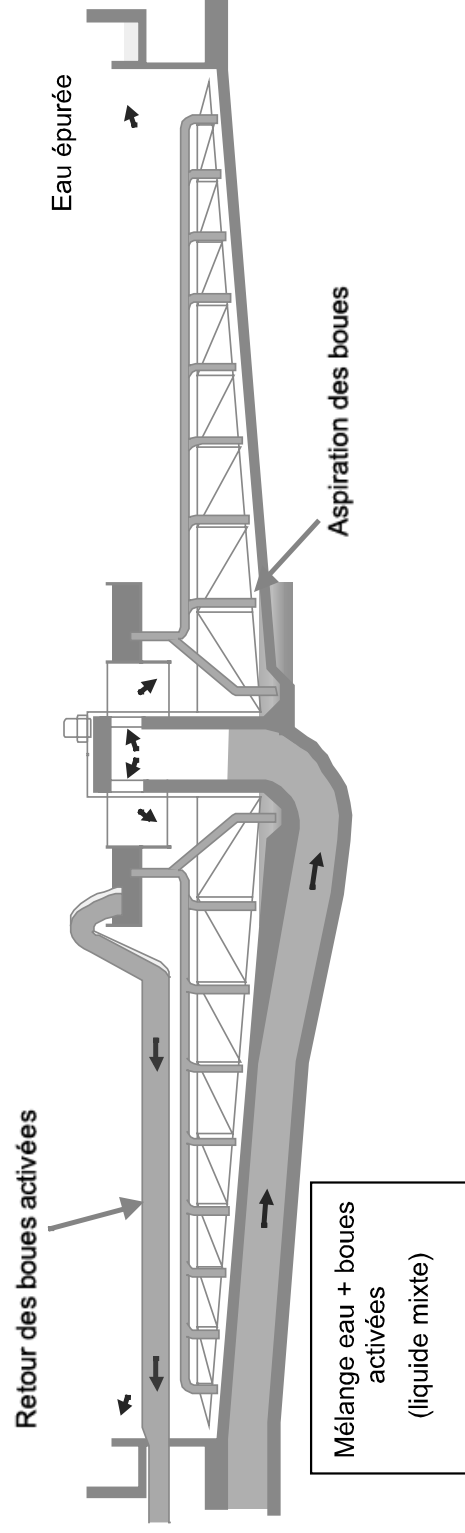
Les **prétraitements** permettent d'éliminer la fraction la plus grossière, afin de ne pas gêner les opérations ultérieures. Ce sont le dégrillage, le dessablage, le dégraissage également appelé deshuilage.

La **décantation primaire** permet d'alléger les traitements biologiques ou chimiques ultérieurs, en éliminant une partie des solides en suspension. L'efficacité du traitement dépend du temps de séjour et de la vitesse ascensionnelle (qui s'oppose à la décantation). La décantation primaire permet d'éliminer, pour une vitesse ascensionnelle de 1,2 m/h, 40 à 60 % des MES, soit 10 à 30 % des virus, 50 à 90 % des helminthes et moins de 50 % des kystes de protozoaires (Faby, 1997). La décantation des MES entraîne également avec elle des micro-polluants.

La décantation secondaire, également appelée **clarification**, intervient après un traitement biologique ou chimique, afin d'éliminer les floccsⁱ issus des traitements biologiques ou chimiques. Lors d'une phase de décantation, l'élimination des micro-organismes se fait principalement par décantation des MES (sur lesquelles ils sont adsorbés).

ⁱ Agglomérat de fines particules ou de micro-organismes en suspension dans l'eau

Figure 3. Traitement par boues activées : clarificateur. Usine Seine Amont (c) Siaap 2002



Les traitements physico-chimiques

Ils sont généralement utilisés dans les stations d'épuration de grande capacité, ou dans celles ayant à faire face à de grandes variations de charge dans l'année (zone touristique). Ils comportent classiquement deux phases : une phase de **coagulation** par des sels de fer ou d'aluminium, puis une **floculation** des colloïdes formés. La séparation du floc a lieu pendant la phase de **clarification** (décantation secondaire). Les procédés les plus modernes utilisent du microsable injecté dans l'effluent afin d'accélérer la décantation des floes. On parle alors d'élimination à floes lestés (Lazarova, 2003). Les traitements physico-chimiques permettent un bon abattement des virus. Cependant, leur utilisation, et notamment le dosage de sels de fer et d'aluminium, n'est pas toujours bien optimisée, sinon maîtrisée. Il y a donc un risque de surcoût lié à une mauvaise utilisation, voire un risque environnemental (Asano, 1998).

Les traitements biologiques

Le **traitement par boues activées** est très largement utilisé. Il s'agit d'un réacteur qui contient les eaux à traiter, dans lequel est injectée une boue chargée de bactéries. Les bactéries consomment la matière organique et contribuent à l'élimination de l'azote et du phosphate. A la sortie du réacteur, l'effluent passe dans un clarificateur. La boue décantée est séparée en deux flux : l'un rejoint le réacteur (ensemencement) et l'autre est évacué vers la filière des boues. L'action des bactéries dans le réacteur nécessite de l'oxygène.

Selon Faby (1997), une épuration biologique (boues activées puis bassin de clarification) permet d'éliminer 90 % des virus, 60 à 90 % des bactéries, mais par contre a peu d'effet sur les kystes de protozoaires et les œufs d'helminthes. Selon Asano (1998), un traitement par boues activées élimine 90 % des bactéries entériques, 80 à 99 % des entérovirus et des rotavirus, 90 % de *Giardia* et de *Cryptosporidium*. L'élimination a lieu grâce à la sédimentation des MES, la compétition avec les micro-organismes non pathogènes et la température ; la part la plus importante est due à la sédimentation.

L'**épuration sur lit bactérien** est le plus ancien procédé biologique. Des bactéries sont cultivées sur un substrat neutre, comme de la pierre concassée, du pouzzolane (sable volcanique), du mâchefèr ou du plastique. On fait passer l'effluent sur le substrat. La difficulté consiste à trouver la bonne vitesse du flux d'eau, qui ne doit pas être trop rapide (pour permettre

la dégradation bactérienne) ni trop lent (pour une bonne évacuation des MES en excès). Une épuration sur lit bactérien est plus efficace qu'un traitement à boues activées car elle élimine non seulement virus et bactéries (respectivement 30 à 40 % et 50 à 95 %) mais aussi les œufs d'helminthes (20 à 90 %) et les kystes de protozoaires (83 à 99 % des kystes d'*Entamoeba histolytica*) (Faby, 1997).

Le dernier traitement biologique mis au point est le **biofiltre**, qui combine les actions épuratrices de la filtration et de l'activité microbienne. C'est un traitement intensif qui est rapide à mettre en place, qui prend peu de place, et qui ne nécessite pas de bassin de clarification. Il est donc beaucoup utilisé dans les unités de traitement individuelles. Par contre, il nécessite un nettoyage fréquent du filtre. Son efficacité serait similaire à celle des boues activées.

Les traitements extensifs : le lagunage secondaire

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

Les bactéries pathogènes sont éliminées de 90 à 99 %. L'élimination des virus est un peu moins efficace (Asano, 1998). Faby écrit que pour un lagunage secondaire à plusieurs bassins, dont les profondeurs sont comprises entre 0,7 et 1,2 m et pour une durée de rétention supérieure à 60 jours, la concentration finale en bactéries dans l'effluent est inférieure à $10^4/l$. Si la durée de rétention est suffisante, les œufs d'helminthes peuvent être éliminés à 100 % par décantation.

Le lagunage secondaire est donc un moyen peu coûteux et efficace de traiter les eaux usées. Il nécessite peu de moyens financiers, techniques et humains. Cependant, il requiert une surface importante. On retiendra que l'efficacité du traitement dépend surtout de la durée de rétention et des conditions climatiques. Ainsi, il est moins efficace en hiver qu'en été.

Les procédés de désinfections supplémentaires

A l'issue des procédés décrits précédemment, les eaux sont normalement rejetées dans le milieu naturel. Dans le cadre d'une REUE, les eaux usées nécessitent des traitements supplémentaires, essentiellement pour éliminer les micro-organismes qui pourraient poser des problèmes sanitaires. Ce ne sont pas des traitements d'épuration « classiques » (mis à part le lagunage) ; par contre ils sont fréquemment utilisés dans les usines de production d'eau potable. On peut donc supposer qu'ils constituent l'aménagement technique minimum d'une station d'épuration en vue d'une REUE.

Les traitements chimiques et les ultraviolets

Le **chlore** est un oxydant puissant qui réagit à la fois avec des molécules réduites et organiques, et avec les micro-organismes. Les traitements de purification et de clarification en amont ont une très grande importance pour permettre une bonne efficacité du traitement, et éviter d'avoir à utiliser trop de chlore. D'autant plus que le coût de la déchloration, qui permet de limiter considérablement l'effet toxique de certains produits dérivés formés lors du traitement, est élevé.

L'**ozone** est un procédé de désinfection utilisé aux États-Unis, en Afrique du Sud et au Moyen-Orient essentiellement. En France, seule la station d'épuration de Saint-Michel-en-Grèves (Côtes d'Armor) en est équipée à notre connaissance. Il permet l'élimination des bactéries, des virus et des protozoaires. C'est le seul procédé vraiment efficace contre les virus (Lazarova, 2003). Les tests de toxicité effectués sur des poissons, des crustacés et des algues n'ont pas permis de mettre en évidence une quelconque toxicité (Cauchi, 1996).

On peut également utiliser l'**acide peracétique**, le **dioxyde de chlore** et les **ferrates**. Leurs caractéristiques sont décrites dans l'annexe 5.

Le traitement par **rayons ultraviolets** utilise des lampes à mercure disposées parallèlement ou perpendiculairement au flux d'eau. Leur rayonnement s'attaque directement aux micro-organismes. Ce traitement est très simple à mettre en œuvre, car il n'y a ni stockage, ni manipulation de substances chimiques et les caractéristiques chimiques de l'effluent ne sont pas

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

- les lampes, qui doivent être remplacées régulièrement : elles sont usées au bout d'un an et demi. De plus, elles doivent être nettoyées car elles ont tendance à s'encrasser ;
- la qualité de l'effluent : les MES et certaines molécules dissoutes absorbent les UV, ce qui diminue l'efficacité des lampes.

Les désinfections utilisant des produits chimiques (chlore, ozone, etc.) sont efficaces, sauf contre *Cryptosporidium*. Il a été montré que des kystes de *Cryptosporidium* pouvaient résister à des traitements à pH = 11,2, à la chloration et à d'autres traitements chimiques (Rose *et coll.*, 1999). Cependant, la plus grande partie des kystes de *Cryptosporidium* sont éliminés pendant les phases primaires de décantation et coagulation/floculation. Par ailleurs, il faut trouver l'équilibre entre le risque posé par les désinfectants en eux-mêmes, et le risque lié aux micro-organismes pathogènes (Asano, 1998). C'est essentiellement le cas pour le chlore dont l'utilisation crée des dérivés halogénés potentiellement cancérigènes. Pour les ultraviolets, ce problème ne se pose pas. Leur action sur les virus et les coliformes fécaux est bonne. Seules les formes de résistances, comme les œufs d'helminthes, ne sont pas trop affectées (Cauchi, 1996). Le traitement aux rayons UV est plus économique et pose moins de problèmes de toxicité que le chlore. Il est beaucoup utilisé aux États-Unis et au Canada.

Les membranes

Les membranes permettent de filtrer et d'éliminer toutes les MES, tous les micro-organismes et toutes les substances qui s'y adsorbent. Seules subsistent les matières dissoutes. L'efficacité épuratrice d'une membrane dépend de son « **seuil de coupure** ». Selon Lazarova (2003), un seuil de coupure de 0,035 µm permet de désinfecter de manière quasi-totale. Les autres avantages d'un traitement par membranes sont une réduction considérable de la surface nécessaire pour le site de traitement (moins 50 % de surface totale au sol et moins 40 % du volume d'un bassin biologique, toujours selon Lazarova) et une automatisation poussée de l'usine. Par contre, les membranes nécessitent d'être nettoyées régulièrement pour continuer à être efficaces. De plus, le traitement par membranes est un procédé dont le coût est élevé. La filtration est très efficace pour l'élimination des micro-organismes, d'autant plus que ceux-ci

sont gros. L'osmose inverse, qui est une technique de filtration encore plus fine, et qui permet de séparer également les substances dissoutes, est tout aussi efficace.

Le lagunage tertiaire

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

L'infiltration/percolation

L'infiltration ou percolation consiste à traiter l'eau par l'intermédiaire du sol ou d'un massif filtrant. On infiltre les effluents à raison de quelques centaines de litres d'effluent par mètre carré de massif filtrant et par jour. Trois mécanismes entrent en jeu :

- la **filtration** des MES : plus le sable est grossier, plus la fixation des MES se fera en profondeur. Les MES finissent par colmater le filtre. Pour lutter contre le bouchage du massif filtrant, il faut donc alterner phase d'infiltration et phase de séchage. L'élimination des MES permet également l'élimination des micro-organismes qui y sont fixés ;
- l'**adsorption** des bactéries libres par les grains de sable du filtre : il se forme alors un film biologique contaminé, surtout dans la partie supérieure ;
- ce film va permettre une **dégradation microbienne** de la matière organique et des substances dissoutes dans l'effluent (phosphates, nitrates, etc.). Cette dégradation consomme de l'O₂ et produit du CO₂, il faut donc aérer régulièrement le film pour éviter l'asphyxie du milieu.

Les techniques d'infiltration/percolation permettent l'élimination des « gros » micro-organismes (protozoaires et helminthes) par filtration/adsorption au début du massif filtrant. L'élimination des virus et des bactéries est fonction du milieu poreux, de la vitesse de percolation, de l'épaisseur du massif filtrant et du niveau d'oxydation de l'eau filtrée (Faby, 1997).

Tableau 9. Élimination des pathogènes par les différents traitements

	Virus entériques	Salmonella	Giardia	Cryptosporidium
Concentration dans les eaux brutes (unité/l)	100 000 à 1 000 000	5 000 à 80 000	9 000 à 200 000	1 à 3960
Élimination par...				

Traitement primaire ^a				
Taux d'élimination (%)	50 à 98,3	95,5 à 99,8	27 à 64	0,7
Nombre restant (unité/l)	1 700 à 500 000	160 à 3 360	72 000 à 146 000	

Traitement secondaire ^b				
Taux d'élimination (%)	53 à 99,92	98,65 à 99,996	45 à 96,7	
Nombre restant (unité/l)	80 à 470 000	3 à 1 075	6 480 à 109 500	

Traitement tertiaire ^c				
Taux d'élimination (%)	99,983 à 99,9999998	99,99 à 99,9999995	98,5 à 99,99995	2 à 7 ^d
Nombre restant (unité/l)	0,007 à 170	0,000004 à 7	0,099 à 2 951	

(a) Sédimentation primaire et désinfection

(b) Sédimentation primaire, lit bactérien/boues activées et désinfection

(c) Sédimentation primaire, lit bactérien/boues activées, désinfection, coagulation, filtration et désinfection

(d) Filtration uniquement

Source : Asano (1998), adapté de Yates (1994), Roberston *et coll.* (1994), Enriquez *et coll.* (1995) et Madore *et coll.* (1987)

Tableau 10. Charge métallique dans les effluents secondaires de stations d'épuration d'Île-de-France

Métal	Station mixte ^a - moyenne pour 13 stations (en µg/l)	Station urbaine – moyenne pour 12 stations (en µg/l)
Cu	55	24
Cd	0,5	0,1
Cr	15	9
Ni	35	24
Zn	148	92
Hg	0,31	0,27
Pb	11	9

(a) station qui collecte à la fois des effluents industriels et urbains

(Source : AESN, *in* Cauchi, 1996)

Bilan des traitements

Abattement des micro-organismes

La combinaison des différents traitements précédents permet, s'ils sont réalisés correctement, de réduire de manière tout à fait considérable la quantité de micro-organismes pathogènes, comme le montre le tableau 9.

Abattement des métaux lourds

Les rejets en métaux lourds des effluents des stations d'épuration d'Île-de-France sont présentés dans le tableau 10. Ces charges sont du même ordre de grandeur que celles des eaux superficielles sauf pour le zinc (Cauchi, 1996).

On peut également les comparer avec les normes de potabilité. Ainsi, selon la législation françaises en vigueur pour les EDCHⁱ (décret n° 89-3 du 3 janvier 1989 modifié) :

- la concentration en plomb ne doit pas dépasser 50 µg/l. Or les effluents secondaires contiennent ici en moyenne entre 9 et 11 µg/l ;
- la limite maximale pour le mercure est de 1 µg/l. La charge métallique des effluents est comprise en moyenne entre 0,27 et 0,31 µg/l ;
- la concentration en cadmium ne doit pas dépasser 5 µg/l. La charge des effluents est comprise en moyenne entre 0,1 et 0,5 µg/l.

Il apparaît donc que la charge métallique des effluents secondaires ne dépasse pas les critères de potabilité en vigueur, du moins pour les métaux ci-dessus. Cette constatation met en évidence le fait que la dangerosité éventuelle des métaux lourds en REUE ne sera pas liée à des ingestions d'eau directes, mais plutôt à la consommation de végétaux contaminés, par effet de concentration dans la chaîne trophique.

ⁱ Eaux destinées à la consommation humaine, communément appelées « eaux potables ».

Analyse de la qualité des eaux après traitement

De telles études sont souvent réalisées en préalable à une opération de REUE, afin d'apporter les assurances sanitaires nécessaires. Les contaminants les plus étudiés sont les micro-organismes. Les formes de résistance des protozoaires et des helminthes (resp. les kystes et les œufs) sont les plus problématiques.

Les études concernant uniquement les micro-organismes

Sheikh *et coll.* ont étudié en 1998 des eaux épurées désinfectées par un traitement tertiaire (filtration et désinfection), en vue d'un usage agricole. Aucune souche de *Salmonelle*, *Cyclospora*, et *E. Coli* n'a été détectée dans les échantillons d'eau recyclée. Les analyses effectuées l'année suivante (Sheikh *et coll.*, 1999) ont montré que le niveau de qualité pour les protozoaires *Cryptosporidium* et *Cyclospora* était équivalent ou meilleur que n'importe quel autre type d'eau, dont des eaux destinées à la production d'eau potable. Il est même meilleur que celui d'eaux destinées à l'irrigation utilisées dans plusieurs états des États-Unis et du Canada. Cette étude complète une autre étude réalisée en 1987 qui avait obtenu des résultats semblables pour les virus. Les auteurs concluent que l'eau recyclée, après un traitement tertiaire, est aussi saine pour l'irrigation des cultures que n'importe quelle autre source d'irrigation d'usage courant.

Rose *et coll.* (1999) ont testé l'efficacité d'un traitement tertiaire dans la perspective de pallier aux besoins d'eau potable de la ville de Tampa en Floride. Les résultats font apparaître que 99,99 % des virus, 99,9999 % des bactéries et 99,9 % des protozoaires entériques sont éliminés. *Cryptosporidium* est le micro-organisme le plus résistant à la désinfection. Mais il ne pose pas de problème majeur étant donné qu'il s'élimine facilement par décantation dans les phases primaires du traitement.

D'autres études traitent des dangers liés à l'utilisation directe d'eaux usées brutes. Devaux a ainsi référencé six études (cf. annexe 8) qui mettent en évidence les risques à utiliser des eaux usées brutes (exemple de Mexico), mais ceux-ci sont considérablement réduits après un traitement.

Les études « exhaustives »

Elles nous donnent des informations précieuses sur la quantité en éléments traces après traitement.

L'étude de Denver (1990) a été réalisée afin de savoir dans quelle mesure les eaux usées peuvent être employées pour produire de l'eau potable, ce qui nécessite un traitement assez poussé. Une station de traitement d'une capacité de 4 000 m³/jour a été construite spécialement. Cette étude a été lancée à la suite d'une décision de justice imposant à la société distributrice d'eau de chercher des formes alternatives au prélèvement direct en rivière. Après des recherches dans les années 70 sur les différentes réutilisations envisageables (industrielle, agricole, potable), c'est finalement l'usage pour l'eau potable qui a été retenu, comme le plus réalisable d'un point de vue légal, économique et technique.

La qualité de l'eau produite par la station a été comparée aux réglementations fédérales, internationales et à celle de l'État du Colorado, ainsi qu'à la qualité actuelle de l'eau potable distribuée à Denver. Des tests de toxicité, et notamment des tests de toxicité chronique ont été menés sur des animaux.

Le traitement, très poussé, consiste en :

- traitement chimique (élimination des MES) ;
- filtration (élimination des MES, baisse de la turbidité, barrière physique contre les micro-organismes) ;
- rayonnement ultraviolet (élimination des micro-organismes) ;
- osmose inverse (élimination des solides dissous, dernière barrière physique contre les bactéries et les particules) ;
- ozonation (désinfection) ;
- chloration finale (désinfectant résiduel) ;

Des tests analytiques ont été réalisés sur les contaminants présents le plus souvent dans l'eau, selon 110 paramètres différents ; 18 micro-organismes (*Shigella*, *Cryptosporidium*, *Giardia*, etc.), 75 micro-polluants inorganiques (métaux lourds et nitrate) et 12 micro-polluants organiques ont été recherchés. Plus de 10 000 échantillons ont été prélevés en deux ans, de 1989 à 1990. Cette étude longue a permis d'évaluer l'impact de la qualité de l'effluent des eaux usées entrant dans la station sur la qualité de l'eau en sortie. A la suite de ces tests, il a été établi que l'eau traitée satisfait toutes les réglementations de différents états américains, de l'EPAⁱ, de l'OMS et de l'Union Européenne. Elle est également d'un niveau de qualité comparable à celui de l'eau potable de Denver. Bien que la **ressource** soit excessivement polluée, jamais l'eau traitée n'a dépassé les normes sus-citées, pour n'importe quelle norme et pour n'importe quel produit.

Des tests de toxicité à long terme ont été menés sur des rats et des souris. Les tests de toxicité chronique sont le test ultime pour estimer la dangerosité potentielle d'une substance. L'administration d'eau traitée et d'eau potable de Denver, avec des niveaux en polluant concentrés 500 fois par rapport à leur taux moyen, n'a été suivi d'aucun effet toxicologique ou cancérogène. Une étude menée sur deux générations n'a pas montré d'effets sur la reproduction.

Cette étude, qui a duré 13 ans, est unique au monde de par sa dimension, son exhaustivité et sa durée. Elle fournit des informations très utiles concernant l'efficacité d'un bon nombre de traitements pour éliminer les pollutions d'origine naturelle et anthropique. Les tests sans précédent menés sur les qualités physiques, chimiques et microbiologiques ont montré un niveau de qualité rarement atteint par une eau domestique classique. Aucun élément dans les échantillons n'a, ne serait-ce qu'approché, la limite réglementaire. La réaction du public a été plutôt satisfaisante, avec une majorité de l'opinion s'estimant favorable à une REUE pour produire de l'eau potable, si le besoin est démontré et si la sécurité sanitaire est assurée. Au vu des résultats, l'acceptation d'un tel projet par les agences de régulations sanitaires américaines peut être considérée comme acquise.

ⁱ Environmental Protection Agency : agence nationale américaine de protection environnementale

L'étude de San Diego (1992) est similaire à celle de Denver, si ce n'est que les produits analysés sont moins nombreux et que l'analyse ne se fait pas sur des critères de potabilité, mais plus en amont dans la chaîne de traitement. L'eau analysée, après un passage dans une station d'épuration, est comparée à l'eau **entrant** dans une station de traitement d'eau potable. L'eau réutilisée est donc considérée comme une ressource brute (*raw water*).

Les paramètres analysés sont des paramètres microbiologiques et chimiques. De plus, des tests ont été effectués sur les effets sur les plantes. Les conclusions de l'étude sont que « le risque sanitaire associé à l'usage de l'eau [traitée] comme ressource d'eau brute est moindre ou équivalent à celui de l'usage des ressources d'eau brute traditionnelle de la ville, c'est-à-dire l'eau entrant dans la station de traitement d'eau potable. »

Conclusion

Le niveau de contamination en micro-polluants des effluents traités, peu étudié, est a priori faible. En effet, la plupart de ces éléments traces sont peu solubles et les traitements des eaux usées (décantation) sont efficaces pour les éliminer. On les retrouve donc plutôt dans les boues que dans les eaux épurées.

Pour les micro-organismes, on peut conclure par cette phrase d'Asano (1998) : « il est clair que les traitements des eaux usées qui existent peuvent réduire la concentration en pathogènes à des niveaux qui sont actuellement considérés comme non dangereux. » Les problèmes sanitaires liés au traitement reposent donc plus sur la fiabilité dans la durée et la prévention des accidents. Les défis à venir sont l'amélioration de l'efficacité des procédés déjà existants, l'élimination de pathogènes nouveaux ou émergents et l'intégration des nouvelles technologies dans les traitements.

Tableau 11. Normes de rejet d'une station d'épuration : concentrations maximales autorisées en DBO₅, DCO et MES

Paramètre	Concentration maximale autorisée
DBO ₅	25 mg/l
DCO	125 mg/l
MES	35 mg/l*

* Pour les rejets dans le milieu naturel de bassins de lagunage, cette valeur est fixée à 150 mg/l

Source : www.cieau.com

Tableau 12. Normes de rejet d'une station d'épuration : concentrations maximales autorisées en azote et phosphore

	Paramètre	Charge brute de pollution organique reçue en kg par jour	Concentration maximale autorisée
Zone sensible à l'azote	NGL*	600 à 6000	15 mg/l
		> 6000	10 mg/l
Zone sensible au phosphore	PT	600 à 6000	2 mg/l
		> 6000	1 mg/l

* Ces exigences se réfèrent à une température de l'eau du réacteur biologique aérobie de la station d'épuration d'au moins 12° C. Cette condition de température peut être remplacée par la fixation de périodes d'exigibilité déterminées en fonction des conditions climatiques régionales.

Source : www.cieau.com

Tableau 13. Eaux usées urbaines, quelques valeurs numériques

MES	DBO	DCO	NTK	P
de 150 à 500 mg.l ⁻¹	de 100 à 400 mg.l ⁻¹ d'O ₂	de 300 à 1000 mg.l ⁻¹ d'O ₂	de 30 à 100 mg.l ⁻¹	de 10 à 25 mg.l ⁻¹

Source : http://perso.wanadoo.fr/bernard.pironin/aquatech/index_1.htm

Les paramètres physiques, chimiques et microbiologiques

Les paramètres non microbiologiques

Les stations d'épuration ont des normes de rejet à respecter pour les **matières carbonées**, les **matières azotées** et les **matières phosphorées**. La réglementation (arrêté du 22 décembre 1994, modifié le 16 novembre 1998) distingue les stations qui rejettent en zone non sensible et celle qui rejettent en zone sensible à l'eutrophisation ; en zone non sensible, seules les normes concernant les matières carbonées sont à respecter, et en zone sensible s'y ajoutent les normes concernant les nitrates et/ou les phosphates (cf. tableaux 11, 12 et annexe 6).

Les rejets en matières carbonées sont mesurés par les trois paramètres suivants :

- la **DCO** (demande chimique en oxygène) : c'est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toutes les matières organiques et les matières minérales contenues dans l'eau ;
- la **DBO₅** (demande biologique en oxygène au bout de 5 jours) : c'est la quantité d'oxygène utilisée en 5 jours par les micro-organismes pour oxyder la matière organique. Onensemence l'effluent et on le sature en oxygène, puis au bout de 5 jours on mesure la quantité d'oxygène consommée. La DBO₅ est en fait une mesure de la fraction organique de la DCO ;
- les **MES** : leur taux est mesuré par filtration puis pesée, ou par centrifugation puis pesée.

Les rejets en matière azotées sont mesurés par 2 paramètres :

- le **NTK** (azote Kjeldahl) : c'est la mesure des matières azotées sous forme réduite, principalement l'urée, d'origine humaine. Le rejet direct de l'azote réduit dans le milieu consomme de l'oxygène et défavorise la vie piscicole ;
- le **NGL** (azote total) : c'est la mesure de l'azote total, réduit ou oxydé. L'élimination du NGL signifie que les nitrates formés ont été éliminés (dénitrification). L'élimination des nitrates permet d'éviter les phénomènes d'eutrophisation.

Le taux de phosphate (**PT**) est également réglementé ; les phosphates rejetés dans le milieu sont en partie responsables de l'eutrophisation des cours d'eau.

Les stations d'épuration versent une taxe aux agences de l'eau en fonction de leurs rejets dans le milieu naturel. La DBO₅, la DCO, le taux de MES et le NTK rentrent dans l'assiette de cette redevance.

Les concentrations moyennes des eaux usées urbaines avant traitement pour ces différents paramètres sont données dans le tableau 13. Pour être conforme à la réglementation, une station d'épuration doit respecter des normes de rejet. Les échantillons moyens journaliers doivent respecter **soit** les valeurs fixées en concentration, **soit** les valeurs fixées en rendement (cf. annexe 6). De plus, les eaux rejetées doivent avoir un pH compris entre 6 et 8,5, et leur température ne doit pas dépasser 25°C.

Les paramètres microbiologiques : indispensables pour une REUE ; notion de germes témoins

On constate que les normes ci-dessus ne prennent pas en considération les rejets microbiologiques des eaux usées, principal facteur du risque sanitaire. Les recommandations nationales et internationales sur la REUE fixent donc, en sus des normes chimiques précédentes, des **normes microbiologiques**, contrôlées grâce à la mesure de la concentration en germes témoins.

Rechercher les organismes pathogènes de manière spécifique est trop coûteux et aléatoire, c'est pourquoi l'on s'intéresse aux concentrations de **germes témoins** (coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux en général) pour estimer la population de pathogènes. En effet, il existe une corrélation entre la présence de ces bactéries témoins et la présence de bactéries pathogènes. Cependant, cette estimation de la contamination de l'eau par l'utilisation de germes témoins n'est pas toujours suffisante. En effet, certains micro-organismes « échappent » à cette surveillance : il s'agit essentiellement des formes de résistance des protozoaires (kystes) et des œufs d'helminthes.

Ainsi, une épidémie à Milwaukee en 1993 aux États-Unis a mis en évidence les failles du système de surveillance sanitaire. En quelques mois, 400 000 cas de gastro-entérites ont été identifiés (dont 80 cas mortels), et si l'origine hydrique de la contamination était suspectée, aucun indicateur de suivi de la qualité de l'eau ne l'avait signalée. En effet, aucun dépassement de norme bactérienne n'avait été enregistré. L'agent microbiologique finalement identifié était un protozoaire parasite, le *Cryptosporidium* (Miquel, 2003). De même, en 1995, une épidémie

de toxoplasmose (protozoaire *Toxoplasma*) qui sévit dans la région de Victoria, au Canada, a été attribuée au système d'eau municipale qui utilisait des eaux non filtrées et traitées au chlore et à l'ammoniaque (Bowie et coll., 1997, in Froese, 1998). On s'est alors rendu compte que la surveillance de la qualité microbiologique des eaux par les seuls germes témoins a des limites. Si elle est efficace en ce qui concerne le risque bactérien, elle ne permet pas toujours de repérer les risques viraux et parasitaires. Ces derniers sont souvent mal connus : on ne connaît pas toujours la dose infectante, ni les méthodes pour les détecter. Par rapport aux bactéries, les doses infectantes sont souvent plus faibles (quelques unités pour les virus, alors qu'il faut des millions de salmonelles pour entraîner la maladie), et leur détection coûte cher : la recherche de la bactérie *E. coli* coûte environ 20 € ; la recherche du *Cryptosporidium* coûte de 500 à 1 000 €... (Miquel, 2003). Aujourd'hui, certains états américains imposent des restrictions sur les quantités de virus.

L'accident de Milwaukee a aussi mis en évidence les limites des traitements de désinfection au chlore, qui sont relativement inefficaces contre les virus et les formes de résistance des parasites (kystes de protozoaires et œufs d'helminthes). Les autres modes de traitement (membrane, lagunage, etc.) sont aujourd'hui en pleine essor.

Le stockage

Le stockage permet de faire face aux **variations de flux** liées aux précipitations ou aux variations démographiques (stations touristiques). Le stockage après épuration de l'eau aura une incidence sur la qualité de l'eau en fonction du temps de rétention :

- un stockage « tampon » : il sert uniquement à réguler les variations quotidiennes de flux dans la station. La durée de stockage peut varier de 24 à 72 h (Cauchi, 1996 ; Faby, 1997), ce qui laisse supposer que la qualité de l'eau n'aura pas varié ;
- un stockage pour affiner le traitement microbiologique, notamment pour les parasites, qui peut durer une dizaine de jours ;
- un stockage de longue durée, plusieurs mois pour certaines réutilisations agricoles (8 mois en Israël, pour irriguer du coton ; Asano, 1998). Dans ce cas, une évolution de la qualité microbiologique est possible.

Ce dernier type de stockage, appelé aussi **stockage intersaisonnier**, peut devenir un véritable traitement supplémentaire. Dans la partie inférieure du bassin la masse d'eau est anaérobie, ce qui permet la dénitrification ; par contre, la partie supérieure est aérobie, ce qui permet la nitrification. La succession nitrification-dénitrification débarrasse les eaux usées des nitrates. De plus, le phosphore est éliminé par sédimentation. Enfin, les bactéries sont détruites par l'action de la lumière. Cependant, le stockage à long terme peut entraîner la formation d'algues ce qui pose des problèmes techniques (bouchage des goutte-à-goutte) et esthétiques. Pour éviter cette prolifération, on peut couvrir les réservoirs. En tant que traitement, le stockage est plus efficace si les bassins ne sont pas alimentés continuellement, mais remplis puis mis en réserve, au coup par coup (Faby, 1997).

Il existe un mode de stockage particulier : la **recharge de nappe** phréatique. Elle nécessite un terrain propice, c'est-à-dire l'existence d'une nappe phréatique perméable, non exploitée, ainsi qu'un site pour l'infiltration, puis la récupération de l'eau. L'injection dans la nappe peut se faire de manière directe, par un système de pompes et de puits plongeant directement dans la nappe, mais ce procédé est coûteux. Il permet de lutter contre l'invasion des nappes par de l'eau salée. Cette injection peut aussi se faire de manière indirecte, par infiltration/percolation. Elle permet un traitement similaire à celui des massifs filtrants évoqués plus haut.

Les problèmes liés au réseau de distribution

Un projet de REUE, en zone urbaine en particulier, exige parfois l'installation d'un réseau double, pour prendre en charge séparément l'eau potable et l'eau épurée. Il existe des problèmes spécifiques aux réseaux de distribution qui sont la formation d'un biofilm, la prolifération de légionnelles, et dans une moindre mesure, une contamination au plomb. Il y a aussi un certain nombre de précautions à prendre pour éviter les confusions entre le réseau d'eau potable et le réseau d'eau réutilisée.

Les problèmes sanitaires et techniques

Les bactéries présentes dans les eaux épurées peuvent s'accrocher aux parois du réseau de distribution et se développer et former ce qu'on appelle un **biofilm**. Le dépôt et le développement des bactéries va dépendre des conditions du milieu : vitesse de circulation de l'eau, taux de matière organique, température... Si le biofilm devient important, les bactéries peuvent se détacher et rejoindre le circuit de distribution. L'épaisseur du biofilm dépend donc de la quantité de bactéries déposées sur les parois, de leur multiplication et de leur arrachage. Le biofilm protège efficacement les bactéries contre les traitements au chlore ; son développement est quasi-inévitable.

Les **légionnelles** sont des bactéries qui se développent dans les conduites en présence d'un biofilm, dans une eau stagnante et chaude (entre 25 et 40°C). L'infection se fait par inhalation et non par ingestion. Ces bactéries peuvent se transmettre par les systèmes générant des embruns : climatisation, brumisateurs, jacuzzi, karcher, etc. Pour prévenir le risque légionnelles, il faut surveiller le système de distribution (éviter la présence de conduites près de chaudières par exemple) et veiller à maintenir la température de l'eau au-dessous de 25°C ou au-dessus de 60°C, températures limites de leur développement (Marsalek, 2001).

Enfin, les réseaux de distribution anciens présentent des risques de contamination au **plomb** ; 2/3 des habitations à Paris sont exposées actuellement au risque plomb, par le biais du réseau de distribution intérieur (Miquel, 2003). Le problème du plomb ne se posera que si le projet de REUE utilise ces anciennes conduites, et si les eaux usées servent à la production d'eau de consommation : cette éventualité est *a priori* improbable en Île-de-France.

Les précautions à prendre

Asano (1998) préconise un certain nombre de mesures :

Les précautions d'usage classiques sont le **marquage du réseau** et **l'information du consommateur**. Dans certains états américains, les réseaux d'eau réutilisée sont peints systématiquement en violet. On peut également colorer l'eau elle-même. Il faut avertir le public de la non-potabilité de l'eau par des panneaux.

La maintenance est à assurer par des **professionnels** ; on doit limiter au maximum l'accès du public au réseau. L'accès aux conduites et aux canalisations doit être strictement réservé au personnel qualifié. Dans le cas de l'irrigation, les zones accessibles au public doivent être arrosées de nuit, ou en dehors des heures d'ouverture.

Enfin, il faut éviter les **connexions accidentelles** entre le réseau d'eau potable et le réseau REUE. La ségrégation entre les deux réseaux doit être complète. Des **contrôles** réguliers de la qualité de l'eau doivent être faits pour détecter ces connexions accidentelles.

Conclusion

A partir d'eaux usées et grâce aux traitements précédents, il est possible d'obtenir toute une « gamme » d'eaux de qualités différentes. A chacune de ces qualités peut correspondre un usage particulier. Dans la partie suivante sont exposés les différents usages possibles et les risques sanitaires particuliers liés à chacun d'entre eux.

Aspects techniques et sanitaires

On peut distinguer cinq catégories de réutilisation :

- réutilisation pour l'irrigation : cultures fourragères ou maraîchères, céréales, prairies, etc. ;
- réutilisation industrielle : circuit de refroidissement, construction, papeteries, industries textiles, etc. ;
- réutilisation en zone urbaine : lutte contre l'incendie, lavage de voirie, recyclage des eaux usées d'un immeuble, arrosage de parcs, golfs, cimetières, etc. ;
- la production d'eau potable ;
- la recharge de nappe phréatique.

Dans les parties suivantes sont présentées les différentes catégories de réutilisation, avec leurs caractéristiques propres et des projets correspondants existant dans le monde et en France. Une partie est spécifiquement consacrée aux risques concernant la réutilisation agricole. Le lien entre le niveau de traitement, les autres usages et le risque est exposé dans le dernier paragraphe.

Notion de risque

D'après Devaux (1999), les études d'estimation du risque distinguent deux types de risque : le risque potentiel et le risque réel.

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 (micro-organisme, métal lourd, etc.). Il dépend de la population qui produit les eaux usées et d'autres facteurs (présence de rejet industriel, réseau unitaire, etc.). Les différents dangers liés à la composition des eaux usées ont déjà été abordés dans la première partie.

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 micro-organismes) ou de rétention (pour les micro-polluants), et de la dose minimale nécessaire pour contaminer un individu (*i.e.* dose infectante pour les micro-organismes et seuil de toxicité pour les micro-polluants). Pour les micro-organismes, des facteurs particuliers interviennent, comme la latence ou la multiplication dans l'environnement. Quant aux micro-polluants, leur passage dans le milieu naturel peut les dégrader en produits plus ou moins dangereux et aux propriétés souvent inconnues.

Le risque réel « correspond à la probabilité [d'être contaminé] dans une population exposée » (Devaux, 1999). 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. »

Cette étude globale et synthétique de la REUE ne se prête pas à une estimation personnelle et statistiquement satisfaisante des risques. Nous nous appuyons donc sur des études scientifiques pour dresser un état général de la connaissance. Nous pourrions alors conclure sur les risques sanitaires d'une REUE, en fonction de l'usage, du niveau de traitement et de la nature du contaminant.

La REUE agricole

L'irrigation est l'activité humaine qui consomme le plus d'eau ; en France, en 2001, 49 % de la consommationⁱ de la ressource en eau était due à l'irrigation (RNDE, 2003). La réutilisation agricole des eaux épurées comme moyen d'économiser la ressource a donc été une des premières voies de développement des projets de REUE. Certains pays devant faire face à de graves pénuries d'eau ont développé en ce sens une politique à l'échelle nationale.

En France, la quasi-totalité des projets de REUE du pays sont des projets agricoles. Ces projets ne sont pas majoritairement situés au Sud mais à l'Ouest. En effet, le Sud est déjà pourvu en moyens de lutte contre la sécheresse (canaux, etc.), et les cas de REUE concernent les îles ou les parcours de golfs. A l'Ouest, la réutilisation correspond d'abord à une stratégie de sauvegarde des milieux récepteurs (littoral, zones sensibles). En effet, la réutilisation évite que les stations d'épuration rejettent leurs effluents polluants dans le milieu récepteur. Au vu des ressources en eau de la France, qui globalement couvrent les besoins, c'est cette stratégie qui devrait surtout motiver les futurs projets de REUE. Ainsi, Faby (1997) affirme : « C'est sous [cet] aspect que la réutilisation rendra le plus de services à l'environnement et à l'utilisateur en France métropolitaine. »

Dans le cas spécifique de l'irrigation, les bénéfices ne résident pas seulement dans la préservation du milieu et de la ressource, mais aussi dans la nature des eaux usées. En effet, elles contiennent des éléments fertilisants (azote, phosphore et potassium) ainsi que des oligo-éléments (fer, cuivre, manganèse, zinc, etc.) qui sont bénéfiques pour les cultures, et qui peuvent augmenter significativement le rendement. Les MES contribuent également à la fertilisation des sols car elles sont riches en matière organique. L'utilisation d'eaux usées à la place d'engrais de synthèse coûteux est économiquement intéressante pour les agriculteurs. De plus, l'arrosage avec des eaux usées constitue une sorte de **fertigation**, c'est-à-dire l'application combinée d'eau et de fertilisants via le système d'irrigation. La fertigation permet un apport fractionné et à faible dose des engrais ; en cela elle est bénéfique pour l'environnement car elle évite la pollution des sols et les dépendances aux fertilisants, qui sont des phénomènes qui apparaissent avec une fertilisation classique (Asano, 1998).

ⁱ **consommation** : les volumes consommés sont les volumes qui après usage, ne sont pas restitués au cycle de l'eau continentale, c'est-à-dire aux eaux de surface ou aux eaux souterraines (volumes perdus par évaporation, pertes, absorption etc.).

prélèvement : les volumes prélevés sont les volumes totaux pris dans le milieu naturel.

Le bénéfice d'une REUE peut donc être double :

- au niveau économique, car en plus d'une préservation quantitative de la ressource, les agriculteurs font des économies d'engrais ;
- au niveau écologique, car en plus de la diminution des rejets d'eaux usées dans le milieu, la pollution agricole diminue.

Mais il faut faire attention à ne pas apporter ces éléments fertilisants en excès. Il y a en effet un triple risque :

- un risque sanitaire : les MES protègent les micro-organismes de beaucoup de traitements, comme les traitements au chlore ou aux ultraviolets. Il existe donc une compétition entre l'élimination des micro-organismes et la préservation des MES en vue d'une utilisation agricole. Comme l'écrit J-A Faby dans son étude pour l'Office international de l'eau : « 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 » ;
- un risque technique : si les MES sont présentes en trop grand nombre, elles peuvent entraîner le bouchage des canalisations et systèmes d'irrigation ;
- un risque agronomique et environnemental : il est possible que les éléments soient apportés en excès. Dans ce cas, il y a un risque de pollution des sols et de diminution du rendement. Les taux en éléments nutritifs (nitrate essentiellement) et la salinité de l'eau utilisée (cause de la dégradation des sols) sont de première importance. Il faut donc trouver le bon équilibre entre le niveau de traitement, les besoins des cultures et la nature du sol.

L'utilisation d'eaux épurées pour l'irrigation doit donc se faire avec précaution.

On retiendra enfin que l'irrigation, qui suit un rythme saisonnier, nécessite en général de grands volumes de stockage.

Les exemples de REUE agricole dans le monde

Les projets se concentrent autour du bassin méditerranéen et dans les pays industrialisés, en Europe, aux États-Unis ou encore en Australie. Certains pays comme la Tunisie ou Israël ont de véritables politiques nationales de réutilisation des eaux usées épurées.

La **Tunisie** a développé un programme de réutilisation des eaux usées épurées dès les années soixante. Dans ce pays, l'augmentation de la population et du niveau de vie ont accru à la fois les besoins en eau et les rejets d'eaux épurées dans le milieu naturel. Les politiques se sont donc trouvées face à une crise économique et écologique dans certaines régions. La première utilisation d'eaux épurées a eu lieu aux alentours de Tunis, pour irriguer 600 ha de citronniers. La nappe qui alimentait autrefois les circuits d'irrigation avait été surexploitée et commençait à être envahie par l'eau de mer. Il a donc fallu trouver une solution alternative. Puis, à partir des années quatre-vingt, une politique ambitieuse de réutilisation a été mise en place. En 1993, 6 400 ha de terres agricoles étaient irriguées avec des eaux épurées, et ce chiffre devait atteindre 20 à 30 000 ha dans les années suivantes (Asano, 1998). Le traitement préconisé est le bassin de maturation, le plus adapté aux conditions techniques et économiques locales. Les restrictions d'utilisation ne concernent que les légumes destinés à être consommés crus ou cuits, selon la réglementation tunisienne établie en 1989 (Puil, 1998).

Israël mène aussi une politique de réutilisation à l'échelle nationale. Le projet de la région de Dan concerne 1,3 millions de personnes. Les eaux usées de Tel Aviv et des municipalités environnantes sont récupérées, traitées puis infiltrées par percolation dans une nappe phréatique. Le prélèvement pour l'irrigation se fait par pompage dans la nappe. La réutilisation des eaux usées épurées est donc indirecte. Le passage dans la nappe est à la fois un stockage et un moyen de traitement.

Aux **États-Unis**, 34 états disposent de réglementations concernant l'usage agricole des eaux usées. La Californie fait office de précurseur. Sa réglementation sur la qualité des eaux et leur utilisation, dénommée « Title 22 », est une référence au niveau international (nous la détaillerons dans la quatrième partie). Respectivement 63 % et 34 % des eaux usées des états de Californie et de Floride sont réutilisées pour l'agriculture (Écosse, 2001).

Au **Mexique**, en 1996, les eaux usées brutes (non traitées) de Mexico étaient utilisées pour irriguer 85 000 hectares de maïs, d'orge et de tomates, dans ce qui constituait le plus grand plan d'irrigation au monde. Les critères sanitaires de la réglementation ont depuis changé, ce qui est

heureux au vu de l'étude épidémiologique réalisée dans cette région mettant en évidence une augmentation des maladies intestinales liées à l'irrigation par ces **eaux brutes** (Puil, 1998).

Des pays comme la **Grèce**, le **Portugal**, l'**Italie**, l'**Espagne** ont des programmes plus ou moins avancés de REUE pour l'agriculture. En Europe du nord, l'**Allemagne** et la **Hongrie** utilisent les eaux épurées pour irriguer des céréales, des pommes de terre, etc. mais à moindre échelle.

Notons que, mis à part le cas exceptionnel de Mexico, aucun des rapports concernant ces différents cas de réutilisation ne fait état de problèmes sanitaires.

Deux exemples extrêmes français : Achères et Clermont-Ferrand

En France, l'irrigation agricole est la principale voie de réutilisation des eaux usées épurées, mais les projets menés sont peu nombreux, concernent de petites surfaces et sont loin de faire l'objet d'une coordination nationale ou régionale. La pays est doté d'une réglementation par l'intermédiaire des recommandations du CSHPFⁱ publiées en 1991, qui reprennent les principes de l'OMS.

Les motivations principales pour les projets de REUE en France sont les pénuries locales (îles, petits bassins versants) et la protection du milieu récepteur. Les milieux qui sont protégés en priorité sont :

- les zones côtières, notamment celles où est pratiquée la conchyliculture, à cause des risques de contamination bactérienne ;
- les zones de baignade ;
- les zones sensibles à l'eutrophisation.

La nécessité de protéger les eaux de baignade en rivière et les zones sensibles est maximum en été, période où les besoins de l'agriculture sont aussi maximum. Cette conjoncture devrait être favorable aux projets de REUE.

ⁱ Conseil supérieur d'hygiène publique de France

A notre connaissance, à l'exception du cas particulier d'Achères, aucune REUE à usage agricole n'existe en Île-de-France. Nous détaillons ci-après les cas particuliers d'Achères, à cause de son importance historique, de son implantation en Île-de-France et du fait que les eaux utilisées sont traitées depuis peu de temps, et de Clermont-Ferrand, qui est le plus grand projet en France.

Achères (Yvelines)

Achères est un des rares exemples, sinon le seul, de la réutilisation **d'eaux usées brutes** en France. Cependant, la réglementation stipule aujourd'hui qu'un traitement est toujours nécessaire afin de réduire les risques sanitaires.

A la fin du XIX^e siècle, les eaux usées de la ville de Paris ont commencé à être épandues sur des champs cultivés. Les eaux usées brutes étaient acheminées par un émissaire vers les champs d'épandage dans les communes d'Achères (78), de Triel (78), de Méry-sur-Oise (95) et de Pierrelaye (95). Les cultures irriguées étaient destinées à la consommation humaine : zones maraîchères. Afin d'éviter une éventuelle contamination des consommateurs, il était demandé aux agriculteurs de laisser s'écouler cinq jours entre la cueillette des légumes et leur mise en vente. De plus des contrôles microbiologiques inopinés au Marché d'Intérêt National de Rungis étaient menés.

L'épandage des eaux brutes a pris fin en 2000 car les sols étaient pollués par des métaux lourds. Aujourd'hui, seulement 2 000 ha consacrés à la culture du maïs destiné à la consommation animale sont irrigués avec des eaux usées épurées provenant de la station d'épuration de Colombes. Par exemple en 2000, sur environ 102 millions de m³ d'eau entrés en usine, un peu plus de 20 millions (répartis sur les mois de juin, juillet, août et septembre) sont allés, après épuration, vers les champs d'épandage d'Achères.

Cet exemple est intéressant d'un point de vue historique, et montre l'évolution de la perception des dangers liés à une réutilisation d'eaux brutes : au début du XIX^e siècle, la priorité était l'évacuation de l'eau des villes pour en préserver la sécurité (risque d'inondation et risque sanitaire lié à la présence d'eau sale dans la ville) ; puis après les découvertes de Pasteur sur les micro-organismes, une conception hygiéniste qui a donné lieu à la « potabilisation » de tous les usages. Et enfin, aujourd'hui, une conception qui intègre les facteurs « environnement » et « santé publique » dans une conception « durable » de la gestion des eaux usées domestiques.

Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)

Le projet de Clermont-Ferrand est le cas le plus important de réutilisation des eaux usées épurées en France. Initié en 1989 par l'Association syndicale autorisée de Limagne Noire, elle n'a été définitivement autorisée qu'en 1995, sous réserve de la mise en place d'un suivi épidémiologiqueⁱ. En 1996 et 1997, l'irrigation se faisait sur 50 ha (réseau pilote) ; puis en 1998, le périmètre s'est étendu à 580 ha, sur 8 communes totalisant 17 000 habitants. Le réseau d'irrigation est long de 65 km.

La station de Clermont-Ferrand a une capacité de 400 000 équivalents-habitantsⁱⁱ. 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 de décantation primaire, puis dans un bassin à boues activées. Les eaux usées épurées ne sont pas réutilisées pendant cette saison et elles sont rejetées dans la rivière Artière. Cependant, pendant la saison d'irrigation (de juin à octobre), les effluents subissent un autre traitement : ils passent par des lagunes de stabilisation. Ces lagunes appartiennent en fait à une sucrerie jouxtant la station. D'octobre à juin, la sucrerie utilise les lagunes pour stocker et par là-même 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 2 ha et un volume de 42 300 m³. Elles permettent aux effluents d'atteindre le niveau de qualité requis pour l'irrigation (niveau A ; cf. quatrième partie). Les principales cultures sont le maïs, le maïs-semence et la betterave.

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 épurées de la station, qui prennent alors le relais de la campagne d'irrigation. Ainsi, en 1998, 150 000 m³ d'effluents industriels et 440 000 m³ d'effluents domestiques ont été utilisés.

ⁱ Cette étude épidémiologique est développée p. 72.

ⁱⁱ En termes simples, il s'agit d'une estimation de la quantité de pollution rejetée par un usager domestique. Selon l'article 2 de la directive " eaux résiduaires urbaines " du 21/05/1991, l'équivalent-habitant est la " charge organique biodégradable ayant une demande biochimique d'oxygène en cinq jours (DB05) de 60 grammes d'oxygène par jour ". Cette valeur théorique permet d'exprimer dans une unité commune des types de rejets très divers (domestiques, industriels, agricoles).

L'utilisation des eaux épurées urbaines remplace désormais l'utilisation des eaux de surface, **qui étaient prélevées auparavant sans que leur qualité ne soit contrôlée** (Devaux, 1998).

Les autres cas françaisⁱ

Le site de la baie du Mont Saint-Michel (Manche)

La fragilité écologique de la baie du Mont Saint-Michel, l'affluence de touristes en été et le déficit pluviométrique en bord de littoral ont motivé à partir de 1995 un projet de REUE. Le financement a été assuré par le Conseil régional et les Agences des bassins Seine-Normandie et Loire-Bretagne (le site se trouve « à cheval » sur les deux bassins). Un bureau d'étude privé a été mandaté pour suivre techniquement le projet. 47 000 m³ ont été épandus sur 62 ha (neuf exploitations) en 1995, avec un épandage maximum en été sur des cultures très consommatrices (maïs). Le traitement, extensif, consiste en un lagunage naturel (3 bassins successifs de traitement et un bassin de stockage). Les eaux épurées proviennent de 3 communes différentes. Les agriculteurs sont très satisfaits car la REUE leur permet de faire face au déficit hydrique estival, tout en augmentant leur rendement. Sur certaines parcelles, le rendement a été doublé. Les analyses microbiologiques des plantes cultivées (carotte et maïs) n'ont mis en évidence aucune dangerosité pour l'homme.

Le projet du site de Gidy (Loiret)

Le projet du site de Gidy est né de la volonté de protéger la nappe aquifère de Beauce. C'est en effet le seul exutoire possible pour les eaux épurées de la région (pas de milieu récepteur superficiel), qui proviennent de la station d'épuration de Gidy (150 000 EH) et d'un établissement pharmaceutique (1 500 EH). La réutilisation des eaux usées épurées permet l'irrigation de 300 ha de terres agricoles, principalement des cultures de maïs et de betteraves. Le volume annuel est de 200 000 m³ d'effluents. L'opération nécessite de stocker l'eau pendant 9 mois, soit un volume de 160 000 m³, ce qui a demandé des aménagements coûteux.

ⁱ Cette liste a été dressée essentiellement à partir de Faby, 1997

La Salaisière-Barbatre (Noirmoutier, Vendée)

L'île de Noirmoutier souffre d'un manque de ressources en eau et a besoin de protéger les côtes (activité nautique et ostréiculture). C'est ce qui a motivé un projet de REUE en 1981. L'irrigation est réalisée sur 220 ha. Aujourd'hui 12 000 tonnes de pommes de terre sont produites chaque année. L'irrigation est uniquement assurée par la REUE. Les agriculteurs doivent stocker ou utiliser la totalité des effluents rejetés par la Salaisière jusqu'au 25 août de chaque année. Au-delà de cette date, le surplus est évacué en mer, l'afflux touristique diminuant en cette saison.

Le traitement se fait par lagunage tertiaire. Quatre lagunes totalisant un volume de 200 000 m³ permettent un abattement significatif des quantités de MES, d'azote et de micro-organismes (Fazio, 2001).

Melle (Deux-Sèvres)

Lors de la réhabilitation de la station d'épuration pour la mettre aux normes, deux bassins de lagunage d'une surface de 2 ha ont été construits, pour l'irrigation d'une exploitation agricole (20 à 30 000 m³). La commune a financé les bassins, le relevage et les canons d'irrigation.

Nouzilly (Indre-et-Loire)

L'INRA de Nouzilly utilise des eaux épurées pour irriguer des cultures fourragères (50 à 60 ha en rotation).

Alès (Gard)

Les agriculteurs sont raccordés au canal dans lequel la station d'épuration rejette ses eaux épurées, depuis 1964.

Ars-en-Ré (Île de Ré, Charente-Maritime)

Les deux bassins de la station d'épuration (2 x 45 000 m³) alimentent 90 ha de pommes de terre. L'eau est filtrée puis javellisée. Cependant, il n'y a pas de contrat entre les exploitants et les services d'assainissement.

Chanceaux-sur-Choisille (Indre-et-Loire)

Les eaux sont traitées dans une lagune de 5 000 m² de faible profondeur, ce qui permet d'optimiser l'action des ultraviolets naturels. Elle servent à arroser un terrain de sport. La totalité des eaux traitées est utilisée en été.

Les échecs

Revest-du-Bion (Alpes de Haute-Provence)

Ce projet est né en 1985, lorsque plusieurs agriculteurs se sont associés pour financer la construction d'un bassin de stockage. La région souffre en effet d'un déficit hydrique en été. Mais en 1995, il n'y avait plus qu'un seul agriculteur qui prélevait de manière épisodique dans le bassin. De plus, en 1996, la qualité de l'eau du bassin s'est dégradée (matières en suspension, boues flottantes), ce qui l'a empêché d'utiliser cette ressource ; l'agriculteur n'a pas souhaité assurer la vidange du bassin.

Le projet du site de Loudun (Vienne)

Ce projet a été conçu car la qualité du cours d'eau dans lequel sont rejetées les eaux épurées devait être améliorée, surtout en période d'étiage. L'étude de faisabilité envisageait d'utiliser un bassin de finition de 12 000 m³ (stabilisation et décantation) comme traitement tertiaire. Puis les eaux épurées devaient être réutilisées par 6 exploitations dispersées. L'étude économique a montré que le coût d'investissement pour une réutilisation agricole (construction d'un bassin notamment) était deux fois plus élevé que celui de traitements tertiaires supplémentaires, donc ce dernier cas de figure était préférable, la valorisation agricole de la réutilisation ne justifiant pas l'investissement important de départ.

Tableau 14. Effets sanitaires sur la population générale dus à la consommation de produits irrigués avec des eaux usées brutes

<p>Baumhogger (1949). Allemagne, Darmstadt</p>	<p>Ascariidose à Darmstadt, en Allemagne L'incidence d'ascaridose dans la population de Darmstadt est de 40 à 50 %.</p>
<p>Ben-Ari (1962), Jjumba-Mukabu et coll. (1971), Shuval et coll. (1984). Israël, Jérusalem</p>	<p>Transmission d'helminthes par des végétaux irrigués avec des eaux usées à Jérusalem Relation entre les échantillons positifs de selles d'Ascaris dans la population à l'ouest de Jérusalem et l'approvisionnement en végétaux irrigués avec des eaux usées brutes.</p>
<p>Gerichter et coll. (1971), Fatta et coll. (1984). Israël, Jérusalem</p>	<p>Épidémie de choléra à Jérusalem en 1970 : le cas de transmission à partir de légumes irrigués avec des eaux usées brutes 176 cas de choléra sont apparus d'août à octobre 1970 à Jérusalem.</p> <div data-bbox="507 1025 1305 1433" data-label="Diagram"> <pre> graph TD A[Premiers cas de choléra introduits depuis l'extérieur] --> B[Arrivée dans les eaux usées des excréta de personnes infectées] B --> C[Utilisation des eaux usées pour irriguer les cultures] C --> D[Mise sur le marché des légumes contaminés] D --> E[Ingestion de légumes contaminés] E --> B </pre> </div> <p>Cycle hypothétique de la transmission de <i>Vibrio cholerae</i>. (Source : Shuval, 1996)</p>
<p>Shuval (1993) Chili, Santiago</p>	<p>Investigation au sujet de la transmission de la fièvre typhoïde et du choléra par l'irrigation à partir d'eaux usées à Santiago au Chili Des taux d'incidence de fièvre typhoïde élevés ont été observés à Santiago du Chili avec des pics de 210 cas / 100 000 en 1977 et 1982. Le pic de fièvre typhoïde observé à Santiago en été correspond au pic de la saison d'irrigation et de la récolte des végétaux irrigués avec les eaux résiduaires. En avril 1991, une épidémie de 41 cas de choléra est survenue au Chili, due probablement à des cas provenant du Pérou. 68 % des cas de choléra ont consommé des salades irriguées avec des eaux usées.</p>

Source : Devaux (1999)

Les risques liés à la réutilisation agricole des eaux épurées

Les risques liés à une REUE agricole sont :

- le risque microbiologique ;
- le risque chimique ;
- le risque environnemental.

Le risque microbiologique

Dans le cas de l'agriculture, il est prouvé depuis longtemps que les micro-organismes pathogènes des animaux ne peuvent ni pénétrer ni survivre à l'intérieur des plantes (Murphy et Syverton, 1985, in Sheikh *et coll.*, 1999). Les micro-organismes se retrouvent donc à la surface des plantes et sur le sol. Les feuilles et la plante créent un environnement frais, humide (évaporation) et à l'abri du soleil. Il peut donc y avoir une contamination pendant la croissance des plantes ou la récolte. Les pathogènes survivent plus longtemps sur le sol que sur les plantes (Asano, 1998).

Des cas de contaminations fécales par l'intermédiaire de produits végétaux arrosés par des eaux usées **brutes** ont déjà été mis en évidence, même si cet exercice est difficile. Par exemple, Froese (1998) rapporte une étude faite par Herwaldt en 1997 dans laquelle une épidémie de cyclosporiose (*Cyclospora cayetanensis*) a été corrélée à une consommation de framboises importées. De la même manière, Devaux recense 4 études sur les risques posés par la consommation de végétaux irrigués par des eaux usées brutes. Des infections ont été observées chez les consommateurs : infections parasitaires (ascaris, trichocéphales) et par des bactéries à dose infectante élevée. Le risque est donc avéré et assez important dans le cas de la réutilisation d'eaux brutes. Il paraît donc indispensable d'utiliser des eaux traitées.

Le mode d'irrigation a une influence directe sur le risque : ainsi, l'irrigation souterraine ou gravitaire peut nuire à la qualité des eaux souterraines et de surface. Des contaminations directes peuvent avoir lieu lors de la maintenance du système d'irrigation. L'irrigation par aspersion crée des aérosols qui peuvent être contaminants.

A la demande du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF), un suivi épidémiologique a été mis en place à partir de 1996 pour l'opération de REUE à des fins agricoles de la région de Clermont-Ferrand. La zone concernée couvre plus de 500 ha et compte plus 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 (resp. 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 REUE 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 micro-biologique (coliformes thermotolérants, entérocoques et salmonelles) des eaux épurées 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 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 (coliformes thermotolérants et entérocoques) égale à celle des effluents **secondaires** ($=10^5$ ufc/100 ml), c'est-à-dire aux effluents **avant** le traitement par lagunage, traitement considéré comme indispensable pour une opération de REUE ! 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 germes témoins de contamination fécale ne permet pas d'affirmer avec certitude que les concentrations en germes **pathogènes** sont différents. La recherche d'œufs d'helminthes (dans l'eau après 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 pas 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 REUE 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 REUE à caractère agricole ne semble donc présenter aucun risque pour les travailleurs et la population générale dans cette étude.

Source : <http://www.waternunc.com/index.php> et Devaux, 1998.

Afin de limiter l'impact sanitaire et psychologique de la réutilisation d'eaux usées pour irriguer des plantes destinées à la consommation humaine, les modes d'arrosage dits « localisés » sont recommandés. C'est particulièrement le cas en Israël. L'**irrigation localisée** consiste à arroser les plantes une par une, à leur pied, par un système de goutte-à-goutte, micro-jet, etc. Elle permet de réduire considérablement les risques de contamination microbologique. C'est une gestion intégrée des risques sanitaires pour laquelle le traitement de désinfection n'est pas le seul facteur permettant de diminuer les risques, mais un des facteurs. Il existe aussi des systèmes d'irrigation localisée souterrains (Masséna, 2001). Le goutte-à-goutte est le système qui expose le moins les populations (professionnels, consommateurs, etc.) et les seuls risques ne sont possibles que pendant la maintenance (débouchage des goutteurs). Elle nécessite en effet un matériel assez fin, qui risque de se boucher facilement à cause des MES, de la précipitation de matières dissoutes et de la formation d'un biofilm (Asano, 1998). L'eau doit donc être traitée en conséquence, et le circuit d'irrigation nettoyé régulièrement.

D'après Cauchi (1996), les populations humaines exposées à une pathologie associée de manière certaine à une utilisation agricole d'effluents bruts ou traités sont de quatre ordres :

- les consommateurs de légumes crus : le risque est statistiquement plus élevé pour les helminthes (par rapport à la population générale), par contre il ne l'est pas pour le risque bactériologique ;
- les consommateurs de viande bovine insuffisamment cuite : la contamination par le ver solitaire (*Tænia*) est possible car les bovins sont des hôtes intermédiaires de cet helminthe ;
- les travailleurs agricoles : le risque est plus élevé pour les helminthes. En laboratoire, il a été mis en évidence que l'exposition aux entérovirus est plus élevée, même si sur le terrain il n'y a pas eu d'augmentation de cas cliniques ; 6 études listées par Devaux (cf. annexe 8) montrent que les travailleurs agricoles sont légèrement plus exposés que la population normale ou que les personnels de station d'épuration et les égoutiers ; les nouveaux travailleurs sont plus sensibles que les anciens : il semble y avoir une adaptation immunitaire aux bactéries et aux virus (Clark *et coll.*, 1981).

- les populations avoisinantes, surtout dans le cas d'irrigation par aspersion qui forme des aérosols. Le risque est légèrement plus élevé pour les helminthes et *Shigella*.

A partir de ces études, Cauchi conclut que le « bilan est maigre au regard du nombre et de la fréquence des pathogènes potentiels [risque potentiel]. Il désigne nettement les helminthes intestinaux comme le risque principal : ascaris, trichocéphales, ankylostomes, à un moindre degré les affections bactériennes (choléra et shigellose), et enfin de façon très limitée, les virus. Comme ceci est le bilan de l'utilisation d'*effluents bruts ou mal épurés*, on peut penser que *le risque réel de réutilisation d'effluents traités est encore moindre.* »

Les risques liés aux éléments traces : le risque chimique

La seule voie de contamination vraiment préoccupante pour les éléments traces est la consommation de plantes cultivées, dans lesquelles ils s'accumulent. Les modes de réutilisation autre que l'agriculture ne semblent pas dangereux et ceci pour deux raisons : premièrement, les quantités d'eau potentiellement ingérables par les utilisateurs sont extrêmement faibles (« boire la tasse » en natation par exemple) et deuxièmement les concentrations en micro-polluants sont infinitésimales dans les eaux épurées. Quant à la réutilisation pour l'eau potable, non seulement elle n'est pas très intéressante dans le cas de l'Île-de-France, mais des études ont montré qu'un traitement suffisant permettait de descendre le risque à un niveau infime (cf. l'étude de Denver). **Le danger réside donc dans la consommation de végétaux contaminés, et exceptionnellement dans une consommation d'eau directe.**

Dans le cas d'une réutilisation agricole, par contre, l'accumulation des micro-polluants dans les plantes peut sembler plus problématique. Mais certains de ces micro-polluants peuvent être intéressants en tant que facteurs de croissance des végétaux ; il faut donc trouver un équilibre entre le risque sanitaire et l'intérêt agronomique.

Les métaux lourds

On peut séparer les métaux lourds en quatre classes, selon qu'ils sont ou non indispensables au développement des végétaux, et selon qu'ils posent ou non des problèmes sanitairesⁱ.

Le manganèse (Mn) et le Fer (Fe) sont tous deux indispensables au bon développement des végétaux, et leur utilisation en agriculture ne pose pas de problème pour la santé. En effet, ils sont déjà naturellement présents en forte proportion dans les sols.

Les métaux suivants ne sont pas indispensables pour les végétaux, mais ne présentent pas non plus de danger pour l'utilisation agricole. En effet :

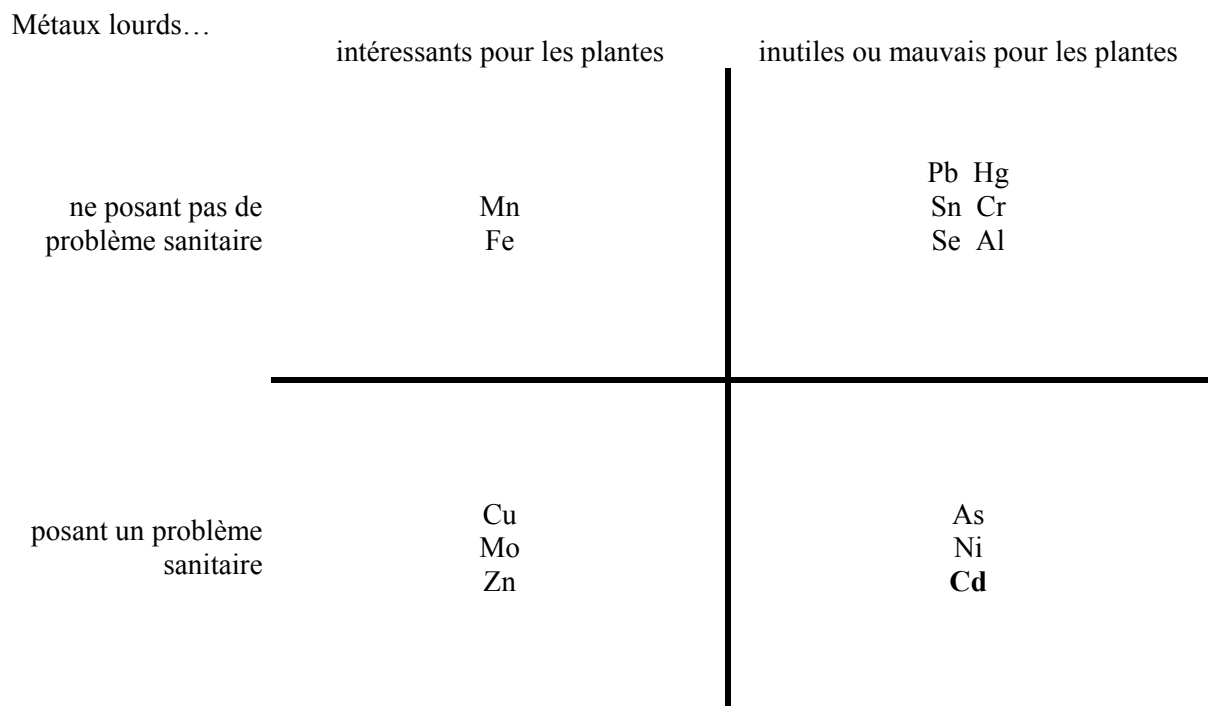
- le plomb (Pb) reste fixé au sol et par conséquent ne pénètre pas dans les plantes ;
- le sélénium (Se), l'étain (Sn) et le mercure (Hg) sont présents à des teneurs trop faibles dans les eaux épurées pour poser des problèmes sanitaires ;
- le chrome (Cr) est sous forme ionique (Cr^{3+}), qui est peu toxique et qui ne pénètre pas dans les végétaux ;
- enfin, l'aluminium (Al) est déjà présent naturellement dans les sols, en forte proportion.

Il existe des métaux lourds indispensables pour les végétaux, mais dont l'utilisation en agriculture peut poser des problèmes. Il s'agit :

- du cuivre (Cu), qui présente une certaine toxicité pour les animaux d'élevage ; cependant le seuil de phytotoxicité est atteint avant celui de zootoxicité, c'est-à-dire que l'on va pouvoir détecter la contamination chez les plantes en premier et par là éviter de les donner à manger aux animaux ;
- du molybdène (Mo), qui n'est pas phytotoxique, mais qui peut poser un problème sanitaire pour le bétail ;
- du zinc (Zn) qui est peu toxique, mais qui s'accumule très facilement dans les tissus végétaux.

ⁱ Cette classification a été réalisée à partir des recommandations du Conseil supérieur de l'hygiène publique de France (CSHPF) de 1991.

Figure 4. Classification des métaux en fonction de leur dangerosité et de leur intérêt agronomique



Enfin, il existe trois métaux lourds qui ne sont pas indispensables au développement des végétaux, et qui, de plus, sont dangereux d'un point de vue sanitaire. Il s'agit :

- de l'arsenic (As) : une nouvelle valeur limite a été recommandée en 1993 par l'OMS, et adoptée par l'Union Européenne (1998) et la France (2001). Le niveau d'arsenic toléré pour la potabilité a ainsi été abaissé de 50 µg/l à 10 µg/l (Miquel, 2003) ;
- du nickel (Ni) : il est peu toxique, mais s'accumule facilement dans les tissus végétaux ;
- du cadmium (Cd) : c'est de loin le micro-polluant non organique le plus préoccupant. En effet, il est parfois présent à des concentrations importantes dans les eaux usées, il est très mobile dans le sol, il peut s'accumuler dans les plantes et atteindre des concentrations sanitaires préoccupantes avant la manifestation d'effets phytotoxiques. Il peut s'accumuler dans l'organisme et provoquer une intoxication grave. Il est d'ailleurs soumis à différentes réglementations spécifiques, notamment l'OMS qui préconise un apport alimentaire moyen de 0,057 à 0,071 mg/j/individu, ou encore la FAO qui fixe comme taux maximum dans les aliments : 0,1 mg/kg pour les légumes, 0,05 mg/kg pour les céréales et dérivés.

En conclusion, remarquons que le risque posé par les métaux lourds dépend de leur toxicité potentielle et du niveau d'exposition (concentration, durée) ; par ailleurs, certains sont bons pour la croissance des végétaux. Ils s'éliminent facilement par des traitements physiques (décantation) et se retrouvent généralement dans les boues. On notera donc qu'avec un bon traitement, et sauf exception (rejets industriels, accidents), les concentrations de la majorité des métaux lourds dans les eaux épurées domestiques sont trop faibles pour poser un réel problème sanitaire, quelle que soit la réutilisation envisagée, même agricole. Le CSHPF ne fixe pas de normes à leur sujet, mais cite celles de l'OMS comme une référence à prendre en considération.

Les micro-polluants organiques

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. Cependant, l'existence de ce risque potentiel ne conduit pas à une interdiction de l'utilisation d'eaux épurées pour l'irrigation (car il faudrait alors également interdire l'utilisation d'eaux superficielles et de certains produits phytosanitaires selon le même principe). Toutefois, il faut rester prudent, surtout vis-à-vis d'eaux épurées urbaines qui, dans certains cas particuliers, pourraient avoir des caractéristiques chimiques différentes et des concentrations en substances toxiques importantes.

La plupart de ces éléments traces sont peu solubles, et les traitements des eaux usées par décantation sont efficaces pour les éliminer. On les retrouve donc plutôt dans les boues que dans les eaux épurées. Les concentrations infimes dans les effluents d'origine urbaine et leur transfert limité vers les végétaux rendent très faible le risque sanitaire dans le cas d'une réutilisation agricole (Cauchi, 1996), même si certains s'accumulent dans les racines comme le PCB, ou dans les graines de soja pour certains pesticides. Dans le pire des cas, ils ne vont constituer qu'une surcharge au système de détoxification des hommes et des animaux (Faby, 1997).

En conclusion, ce risque est à relativiser par rapport au risque bactérien, qui est bien plus considérable. Par exemple, dans le bassin de l'Adour-Garonne, 1,3 millions de personnes sont confrontées au risque bactériologique, alors que 170 000 personnes seulement le sont au risque pesticidesⁱ (Miquel, 2003). Le problème des pesticides et des métaux lourds est en fait beaucoup plus préoccupant pour le recyclage des boues, dans lesquelles se retrouvent la majorité des micro-polluants. Nous pouvons citer pour finir Cauchi (1996) qui déduit que « les risques sanitaires induits par les micro-polluants présents dans les eaux usées traitées apparaissent [...] très limités. »

ⁱ Pour la distribution d'eau potable

Protection des ressources en eau : le risque environnemental

Les eaux souterraines

La contamination des eaux souterraines dépend de trois paramètres : le sol, les roches sous-jacentes et la nappe.

Deux caractéristiques sont essentielles pour les sols : la capacité de rétention et la capacité d'épuration. Les sols qui ont une bonne capacité de rétention sont les sols argilo-sableux, ceux ayant une mauvaise qualité sont les roches fissurées. Une bonne capacité de rétention assure une bonne assimilation par les plantes et un étalement de la pollution dans le temps. La capacité d'épuration est assurée par la fixation des substances polluantes (adsorption, précipitation), la transformation des molécules organiques par des micro-organismes et l'exportation par les végétaux.

Les réservoirs ayant une perméabilité d'interstices (gravier, sable) permettent une bonne épuration à l'inverse des sols avec une perméabilité de fissures (calcaire, dolomies, granit, etc.).

Les nappes libresⁱ sont les plus exposées à la contamination, non seulement parce qu'elles ne bénéficient pas d'une protection naturelle vers la surface, mais encore parce qu'elles sont en général peu profondes. Les nappes captivesⁱⁱ sont plus protégées mais peuvent être éventuellement contaminées par des forages ou une autre mise en communication avec la surface ou un autre aquifère pollué.

La réutilisation des eaux usées épurées peut donc être remise en cause dans des zones qui cumulent ces facteurs de risque, c'est-à-dire des nappes libres proches de la surface du sol dans des réservoirs avec une perméabilité de fissures. L'utilisation de ces ressources pour l'alimentation en eau des collectivités constitue un facteur aggravant le risque.

Pour ce qui est de la survie des micro-organismes, lors de l'infiltration et des risques de contamination du sol, les bactéries, les protozoaires et les helminthes sont très rapidement éliminés, par les phénomènes d'adsorption et de compétition trophiques selon les mêmes

ⁱ Les nappes libres sont des nappes qui ne rencontrent pas de couche imperméable empêchant leur développement vers le haut

ⁱⁱ Ce sont des nappes qui au contraire ont une couche imperméable au-dessus qui empêche l'eau et donc les polluants de l'eau de passer

phénomènes que les traitements par percolation/infiltration que nous avons déjà décrits. Seuls les virus semblent poser problème, mais les différentes études recensées par Asano convergent toutes vers le fait qu'après quelques mètres (au-delà de 3) la quasi-totalité des virus est éliminée (Asano, 1998).

D'après le CSHPF, les produits les plus préoccupants sont les nitrates et les dérivés halogénés, parce qu'il peuvent migrer en profondeur. La pollution azotée diminue en fonction de la profondeur de la nappe. Il a été prouvé que les eaux provenant de puits de moins de 30 m de profondeur sont plus pollués par l'azote que les autres puits (Nolan *et coll.*, 1997, in Froese, 1998).

De manière générale, le risque semble faible, même si chaque cas particulier doit être soigneusement étudié pour déterminer des facteurs de risques propres à chaque terrain. Il existe des cas où l'utilisation d'eaux épurées en agriculture est toujours préférable à un rejet direct dans la nappe, comme cela se fait dans certaines régions où les rejets sont impossibles à faire vers les cours d'eau.

Les eaux superficielles

Les rejets directs d'eaux épurées posent des problèmes d'eutrophisation des cours d'eau, de qualité de l'eau destinée à la production d'eau potable (norme d'un maximum de 50 mg/l pour l'azote) et de contamination microbiologique des zones de conchyliculture. C'est pourquoi une réutilisation des eaux usées épurées est quasiment toujours préférable à un rejet direct dans le milieu. C'est par exemple le cas de Noirmoutier, où la REUE a été motivée par la volonté de préserver la qualité de la production de coquillages de l'île (Cauchi, 1996).

La REUE industrielle

Il s'agit bien ici de la réutilisation, pour l'industrie, d'eaux usées domestiques d'origine urbaine, et non de la réutilisation d'eaux usées industrielles. Les entreprises possèdent souvent leur propre station d'épuration afin de traiter les effluents spéciaux issus des process industriels. Il arrive parfois qu'elles réinsèrent les effluents épurés dans leur process, mais ce n'est pas ce qui est traité dans cette partie.

Parmi les activités industrielles, la production d'énergie est de très loin le secteur qui prélève le plus d'eau dans le milieu. Ainsi, en France, l'industrie a participé en 2001 à 68 % du *prélèvement* total, dont 57 % pour la seule production d'énergie. Mais à la différence de l'irrigation, par exemple, le taux de consommation¹ est très faible, de l'ordre de 7 % pour les centrales nucléaires (100 % pour l'irrigation). Donc les volumes **consommés** par l'industrie en France en 2001 ne sont que de 25 % du total, dont 22 % pour la production d'énergie (RNDE, 2003).

La REUE industrielle peut donc être intéressante dans le secteur de l'énergie, dans les circuits de refroidissement fermés ou ouverts. Les autres applications possibles concernent les laveries industrielles, les stations de lavage de voiture, l'industrie du papier, la production d'acier, de textiles, les industries d'électroniques et de semi-conducteurs, etc. (Asano, 1998).

La qualité requise est spécifique à chaque industrie parce que sa composition chimique peut avoir des répercussions sur les process industriels. Les préoccupations concernent principalement les phénomènes d'entartrage, de corrosion, de développement de bactéries, d'encrassement, de formation de mousse, et d'inhalation d'aérosols par les travailleurs. Il n'y a pas de problème sanitaire spécifique à l'industrie et on retrouve les mêmes contaminants que pour les autres usages.

Il n'existe pas à notre connaissance de cas de réutilisation d'eaux épurées municipales à destination de l'industrie en France. D'après Asano, un des premiers cas dans le monde est une papeterie du Japon qui est fournie en eaux épurées depuis 1951. Il détaille aussi très largement le cas de la centrale nucléaire de Palo Verde (États-Unis), qui est résumé dans le paragraphe suivant.

¹ C'est la part des volumes non restitués = volume consommé/volume prélevé.

Exemple de la centrale nucléaire de Palo Verde

La station de Palo Verde est la plus grosse centrale nucléaire des États-Unis (4 millions de kW). Elle se trouve à Phœnix, en Arizona. Elle est aujourd'hui l'unique exemple dans le monde d'une centrale nucléaire qui utilise des eaux épurées pour ses tours de refroidissement.

Une centrale électrique a besoin d'eau pour produire de la vapeur (pour faire tourner les turbines) et pour refroidir ses équipements. La centrale consomme environ 6 400 m³ d'eau par minute. Or Palo Verde se situe dans un endroit sans réserves d'eau naturelles (pas de rivières, de lacs ni de mer). La décision a donc été prise de recourir aux eaux usées provenant de la ville de Phœnix. Les eaux usées urbaines sont traitées par une station d'épuration qui a une capacité de 500 000 m³ par jour environ. L'opération a débuté en 1974.

Les problèmes de qualité d'eau qui pourraient empêcher une REUE dans cette centrale ont été référencés : formation de tartre dans les tubes de condensation, corrosion, encrassement bactérien ou organique et formation de mousse.

Les éléments sources de ces différents problèmes sont la quantité de matière en suspension et de matière organique (mesurée par le taux de MES et la DBO₅), l'alcalinité, ainsi que les taux en ammoniac, calcium, magnésium, phosphore, silice et sulfate.

Le traitement préalable à la réutilisation des eaux usées épurées dans l'industrie nécessite donc plusieurs opérations biochimiques et une désinfection au chlore. Par exemple, on injecte de la chaux pour faire précipiter le calcium, les phosphates, le magnésium et la silice. Les traitements sont moins efficaces en hiver, notamment le traitement à la chaux et le traitement bactérien. Les contrôles de qualité sont donc plus fréquents pendant cette saison.

L'opération est un succès. Les effluents urbains sont traités efficacement. La station d'épuration fournit de l'eau de bonne qualité en quantité suffisante. Des efforts continus sont faits pour préserver la qualité de l'eau en hiver, pour améliorer les contrôles de qualité et pour diminuer la quantité d'eau perdue par évaporation.

La REUE en zone urbaine

Les utilisations possibles d'eaux épurées en zone urbaine sont extrêmement nombreuses, et il en existe de multiples exemples à travers le monde. Ces projets concernent :

- l'arrosage de parcs, de terrains de sport, de terrains de golf, d'aires de jeux ;
- les bassins d'agrément, piscines, bassins pour la pêche et la navigation de plaisance ;
- les eaux des sanitaires d'un immeuble ou d'un groupe d'immeubles ;
- le lavage de voirie, réservoirs anti-incendies, etc.

La REUE en zone urbaine nécessite un réseau double qui permet de distribuer séparément les eaux épurées et l'eau potable. Il peut y avoir un réseau double à l'échelle de la ville entière ou à l'échelle de l'habitation. Lors de la modification d'un système déjà existant, l'installation d'un second réseau de distribution peut représenter jusqu'à 70 % du prix d'un projet de REUE (Ecosse, 2001), ce qui peut rendre le projet économiquement irréalisable ; cependant, si le double réseau est installé en une seule fois, lors de la construction d'un nouveau lotissement par exemple, le coût est moins élevé. Ainsi, le surcoût de l'installation d'un réseau double dans un immeuble en construction est inférieur à 10 % du prix du réseau non doublé (Ecosse, 2001).

Aux États-Unis, les premiers systèmes de ce genre ont été développés il y a plus de 70 ans ! Le premier a été construit à Grand Canyon Village (Arizona) en 1926, pour fournir aux habitants de l'eau épurée pour l'arrosage et de l'eau potable.

La qualité requise dans les projets de REUE en zone urbaine a des exigences similaires aux autres réutilisations, avec quelques variances :

- la qualité esthétique est importante : la présence de mousse, d'algues, etc. est à éviter (mauvaise perception de la part du public). Il faut également réduire le développement d'insectes (moustiques...) ;
- la présence d'une faune concentrant des polluants (mercure, DDT, etc.) peut poser problème pour les activités de pêche.

Il est intéressant de noter que la ville de Paris possède un réseau double, dans lequel circule ce que les services techniques de la Mairie de Paris appellent de « l'eau de service ». La construction de ce réseau de distribution d'eau aujourd'hui destiné aux usages de service a débuté sous Napoléon 1er avec la construction du canal de l'Ourcq. Ce réseau s'appelait alors « les eaux publiques ». La faible pression qu'il offrait ne permettait pas de desservir les étages. Un second réseau de distribution d'eau potable (« les eaux privées ») s'est alors vraiment développé sous Napoléon III. Les deux réseaux ont aujourd'hui une longueur équivalente (1 600 km).

*« L'eau de service » est en fait de l'eau de la Seine et du bassin de la Villette, qui est pompée puis simplement tamisée, avant d'être envoyée dans le réseau. Les usines de pompage se situent à proximité d'Auteuil, d'Austerlitz et de La Villette. Cette eau permet actuellement de satisfaire les besoins des divers services municipaux (nettoyement des voiries et caniveaux, chasse des égouts pour le nettoyage des réseaux, alimentation des lacs et rivières des Bois de Boulogne et Vincennes, arrosage de certains parcs...). **Il est surprenant de constater qu'elle ne fait l'objet d'aucune restriction, d'aucune norme ou d'aucun contrôle sanitaire.** La seule contrainte qui s'est imposée au services de la ville de Paris est une contrainte technique, qui les oblige par exemple à utiliser de l'eau potable pour les karchers ou les brumisateurs, afin d'éviter que ces équipements très fins ne se bouchent. L'utilisation depuis des années de cet approvisionnement original, qui peut dans une certaine mesure s'identifier comme une réutilisation indirecte, ne semble avoir posé aucun problème sanitaire grave. Cependant, la question du maintien de ce réseau, vieux de plus de 150 ans et confronté à des problèmes d'entretien, se pose aujourd'hui. (source : www.paris.fr)*

Les pays à la pointe de la REUE en milieu urbain sont en majorité des pays développés et fortement urbanisés : États-Unis, Japon, Corée du Sud, Allemagne. La France est plutôt « en retard » dans ce domaine : les cas de REUE en zone urbaine étant peu fréquents.

Les exemples à l'étranger

Le projet Abricot à Altamonte Springs, en Floride, est un bon exemple d'une réutilisation à l'échelle d'une ville entière. Un réseau double s'étend dans tous les quartiers de l'agglomération. Les usages de l'eau réutilisée sont multiples : lavage de voiture, irrigation de pelouses et de végétaux qui doivent être consommés cuits ou épluchés. L'eau sert aussi à la protection incendie dans certaines parties de la ville. Elle alimente également des fontaines et des chutes d'eau dans des immeubles commerciaux. L'usine de traitement est une station d'épuration qui a été modifiée. Mis à part les taux de phosphore et de nitrate, qui sont utiles en irrigation, l'eau atteint les standards de potabilité : les coliformes fécaux et les virus sont en-dessous des seuils de détectabilité. Il n'est fait part d'aucun problème sanitaire.

Le Japon est à la pointe de la REUE pour les usages urbains tels que l'alimentation des chasses de toilettes. Contrairement aux autres pays où l'utilisation agricole constitue le mode le plus développé, la REUE en zone urbaine est prédominante au Japon. 33 % des foyers installés en zone urbaine recyclent les eaux grises pour l'alimentation des toilettes. A Tokyo, tout immeuble de plus de 30 000 m² de surface de plancher ou susceptible de réutiliser plus de 100 m³ d'effluent traité par jour doit être équipé d'un double réseau de distribution. Les eaux servent aussi à irriguer les jardins ornementaux de la ville et à alimenter les ruisseaux dans les aires de jeu et de sport. La population accepte d'autant plus ces projets de REUE que le traitement de l'eau préalable à la réutilisation est poussé (Puil, 1998).

L'exemple d'Irvine Water Ranch District

La société Irvine Water Ranch District (IRWD) a développé depuis plus de 40 ans la réutilisation des eaux usées épurées dans la ville d'Irvine, en Californie, et aux alentours. Le projet a débuté en 1963. Les quatre premières années, l'eau était distribuée à des agriculteurs. Puis les applications se sont diversifiées.

L'excellente qualité des eaux fournies par IRWD lui a en effet permis d'obtenir un permis d'usage sans restrictions, c'est-à-dire une autorisation d'utilisation « tous usages » pour l'eau, sauf la consommation humaine. C'est la première entreprise à l'avoir obtenue en Californie. En 1991, elle a également été la première des États-Unis à avoir l'autorisation d'utiliser ses eaux réutilisées pour des toilettes d'immeubles de bureaux. Enfin, autre nouveau débouché, l'eau réutilisée est aujourd'hui fournie à des particuliers pour l'arrosage de leur jardin. Les différents projets de IRWD s'accompagnent d'un effort soutenu de communication auprès du public, des élus locaux, des groupes d'intérêts...

La station d'épuration qui alimente le réseau rejette 57 000 m³/jour. Il y a deux réservoirs de stockage : un de 1 800 000 m³ et l'autre de 900 000 m³. La distribution se fait par 320 km de canalisations. Les différents traitements (microfiltration, filtration sur sable, etc.) permettent à la qualité de l'eau d'être conforme aux recommandations « Title 22 » de l'État de Californie et aux exigences propres à chaque client (agriculteurs, entreprises, etc.). La qualité bactériologique est contrôlée régulièrement pour les coliformes totaux, *E. Coli*, les bactéries hétérotrophes et les entérovirus. Une campagne de surveillance sur 2 ans (1995-1996) a permis de s'assurer de la bonne élimination de *Giardia* et *Cryptosporidium*. Il est prévu que la quantité de légionnelles soit testée dans quelques années. Depuis 30 ans, jamais la qualité sanitaire ou environnementale de cette eau n'a été mise en cause.

En plus de l'utilisation agricole sur 400 ha de champs et de vergers, la REUE concerne :

- l'arrosage d'un **golf** et des **espaces verts** de la ville ;
- l'utilisation dans la **construction** pour maîtriser les poussières. Cela permet d'éviter de consommer d'énormes quantités d'eau potable. Les camions qui amènent l'eau réutilisée afin d'arroser les chantiers et les chaussées en construction sont bien identifiés, et il leur est interdit de transporter de l'eau potable ultérieurement sans avoir été désinfectés ;
- l'alimentation d'immeubles de bureaux : au début des années quatre-vingt-dix, sept immeubles de grandes tailles (plus de 25 étages pour certains) de la ville d'Irvine ont été construits avec un double réseau de conduite, pour les **toilettes**. Des études ont montré qu'environ 50 % de l'eau utilisée dans des immeubles de bureaux l'est pour les toilettes. Les conduites de transport d'eau traitée sont marquées et un suivi régulier est opéré afin d'éviter toute connexion entre les deux réseaux ;

- la **climatisation** : on considère généralement que dans un immeuble commercial, 40 % de l'eau est consommée pour alimenter les circuits de climatisation. Depuis la mise en place de la REUE dans certains bâtiments, leur demande en eau potable a diminué de 75 % ;
- l'irrigation de **jardins de particuliers** : 150 maisons sont reliées au réseau. Ces projets sont compliqués puisque chaque cas nécessite la même attention qu'un projet plus important ;
- l'utilisation **industrielle** : cimenterie, lavage de voitures, etc. ;
- l'utilisation dans des bassins ou des jeux d'eau **décoratifs** : elle présente de plus grands risques d'accessibilité pour le public, et de vaporisation à cause des fontaines et du vent. Donc des panneaux d'avertissement sont présents ;
- l'utilisation pour remplir des **bassins naturels** dans le marais de San Joaquin, adjacent à l'usine de traitement, ceci afin de créer un habitat naturel stable pour les migrateurs, protéger des rejets la baie de Newport, et enfin permettre un ajustement de l'offre de IRWD par le biais de ce moyen de stockage.

La production d'eau potable

La réutilisation est **directe** quand l'eau ne revient jamais dans le milieu naturel ; les eaux épurées sont directement acheminées de la station d'épuration à l'usine de traitement pour l'eau potable (système « *pipe to pipe* »). L'unique exemple dans le monde de réutilisation directe se trouve en Afrique, à Windhoek, capitale de la Namibie (Asano, 1998). Cependant, ce mode de REUE sans passer par le traitement supplémentaire offert par le milieu naturel est déconseillé ; il doit être mis en œuvre uniquement quand aucune autre solution n'est possible (Crook *et coll.*, 1999).

La réutilisation est **indirecte et non planifiée** quand les eaux épurées sont rejetées dans un cours d'eau ou une réserve souterraine qui sert à l'alimentation d'une usine de traitement, sans que ce lien soit volontaire. Cette notion est à la limite de la définition d'une REUE.

La réutilisation est **indirecte et planifiée** quand elle consiste à rejeter des effluents de station volontairement en amont d'une usine de traitement, au niveau du plan d'eau ou de la nappe qui sert d'ultime réservoir naturel avant le pompage et le traitement. C'est le cas du comté d'Essex en Angleterre, où une ville de 140 000 habitants, Chelmsford, est alimentée en eau potable pendant l'été par des eaux épurées, après un passage dans la rivière Chelmer (Lunn, 2001).

La production d'eau potable est l'aboutissement le plus extrême de la réutilisation des eaux usées épurées. Elle a lieu essentiellement dans les zones arides ou semi-arides. Le cas unique de Windhoek en Namibie correspond à une situation unique en terme de ressources en eau, et la réutilisation directe était la seule solution envisageable. Il en est de même pour le comté d'Essex, qui se trouve dans la zone la plus « sèche » d'Angleterre. Il ne semble donc pas que ce type de réutilisation soit très approprié à l'Île-de-France, mais on peut tirer beaucoup d'enseignements de l'étude de ces exemples. Ils sont détaillés en annexe 7. D'un point de vue sanitaire, il faut noter qu'aucune incidence sur la santé n'a été relevé, aussi bien à Windhoek, où la REUE existe depuis plus de 25 ans, qu'à Chelmsford (début du projet en 1996).

La recharge de nappe

La principale motivation concernant la recharge de nappe est la dégradation de sa qualité environnementale et/ou la diminution de sa réserve en eau. Ce mode de réutilisation a lieu essentiellement dans des zones arides qui doivent faire face à des problèmes d'assèchement de nappes, ou dans des zones côtières où les nappes sont envahies par l'eau de mer. L'Île-de-France est donc *a priori* peu concernée.

Il existe deux moyens de recharger une nappe phréatique :

- par percolation : c'est le cas à Los Angeles, où 160 000 m³ par jour d'effluents traités sont déversés dans des bassins gravitaires. Le principal problème rencontré est celui des algues, qui pullulent dans les bassins. Les solutions préconisées sont variées : introduction de poissons, d'algicides, teindre l'eau pour empêcher la photosynthèse (*sic*), faire circuler l'eau pour empêcher la stagnation, éviter le stockage dans des lacs peu profonds, éviter de laisser l'eau stagner trop longtemps et couvrir les réservoirs. Un autre problème est la formation d'un microfilm de vase, d'argile et de micro-organismes au fond du bassin qui bloque la percolation (Asano, 1998) ;
- par recharge directe : c'est le cas dans le comté d'Orange, en Californie. L'eau est injectée dans la nappe par plusieurs puits, disposés en ligne face à la nappe d'eau salée, et formant une véritable barrière. L'eau injectée est un mélange de deux tiers d'eaux épurées et d'un tiers d'eau de la nappe. Chaque jour, 57 000 m³ sont déversés dans la nappe (Asano, 1998).

Tableau 15. Évaluation du risque (acceptable ou non) en fonction des traitements et des usages

	Désinfection tertiaire I ^a	Désinfection tertiaire II ^b	Désinfection secondaire ^c
Arrosage de golf	Acceptable	Acceptable	Non acceptable
Irrigation de culture	Acceptable	Acceptable	Non acceptable
Bassin d'agrément sans restriction	Non acceptable	Non acceptable	Non acceptable
Recharge de nappe	Acceptable	Acceptable	Acceptable

(a) Filtration puis chloration directe

(b) Chloration directe

(c) Pas de chloration

Études comparatives des risques en fonction des usages et des traitements

Dans une étude d'évaluation quantitative du risque lié aux virus entériques, Tanaka *et coll.* (1998) ont étudié quatre scénarios : arrosage d'un golf, irrigation de cultures, bassins d'agrément sans restrictions d'usage et recharge de nappe. Les simulations ont été faites selon trois niveaux de traitement : deux traitements de désinfections tertiaires (filtration et chloration) et un simple traitement secondaire sans désinfection. Le risque dépend très fortement du niveau de traitement et de l'usage, comme on le voit dans le tableau 15. Le risque dépend de l'association traitement/usage. Ainsi, pour les deux traitements tertiaires, le risque était acceptableⁱ pour tous les usages sauf la baignade. Pour les effluents secondaires sans désinfection, le risque n'était pas acceptable sauf pour la recharge de nappe.

Devaux a référencé des études (cf. annexe 8) sur le risque particulier d'une infection virale en fonction de l'usage. Il en ressort que le risque est plus élevé dans le cas d'une utilisation récréative que dans le cas de l'irrigation de cultures ou de recharge de nappe. Sont aussi référencées douze autres études sur les risques encourus par les populations exposées aux eaux épurées, soit à proximité d'une station d'épuration, soit à proximité d'une zone agricole irriguée par des eaux épurées. Les résultats sont assez divers : les populations exposées sont parfois plus contaminées, et parfois, non. La transmission des maladies est soupçonnée de se faire par les aérosols, mais rien n'est prouvé. Les familles d'agriculteurs sont plus touchées que la population en général.

Les risques encourus par les travailleurs en contact avec les eaux usées ont été étudiés, essentiellement chez les égoutiers, les employés de stations d'épuration et les agriculteurs. De Serres et Laliberté (1997) (*in* Froese, 1998) ont montré que des travailleurs d'une station d'épuration ayant contracté l'hépatite A avaient été contaminés sur leur lieu de travail. Cependant, il apparaît que les travailleurs de stations et les égoutiers ne sont pas plus infectés que la population générale (Sinneker, 1958 ; Faechem *et coll.*, 1983 ; Clark *et coll.*, 1981 ; Linneman *et coll.*, 1984). Les travailleurs agricoles sont la population la plus exposée (Sinneker, 1958 ; Krishnamoorthi *et coll.* ; 1973 Fattal, Yekutiél, Shuval, 1984) mais Devaux

ⁱLe niveau d'acceptabilité était moins de 10^{-4} (1 personne contaminée sur 10 000) dans au moins 95 % des cas.

(1998) a montré qu'avec un traitement adéquat il était possible de réduire les risques à un niveau acceptable (cf. encadré p. 74).

Par ailleurs, une étude à Colorado Springs a montré que les troubles gastriques n'étaient pas plus nombreux chez des personnes ayant visité des parcs arrosés avec des eaux traitées que chez les personnes ayant visité des parcs arrosés avec des eaux de ruissellement.

Le risque lié à une réutilisation pour des eaux de baignade a été étudié sur une population de sportifs (triathlonsiens) par Medema *et coll.* (1997) (*in* Froese, 1998) et sur des pratiquants de canoë et de rafting (Lee *et coll.*, 1997, *in* Froese, 1998). Parmi les facteurs augmentant le risque de contracter une gastro-entérite, il y avait notamment le fait de boire la tasse ou de tomber à l'eau non intentionnellement. D'après Asano (1998), « remplir des bassins [de baignade] avec de l'eau ayant subi un traitement tertiaire n'augmente pas le risque moyen au-dessus de celui posé par des bassins remplis avec de l'eau stérile (*i.e.* sans micro-organismes). Mais la variabilité est plus forte. »

Enfin, en ce qui concerne la réutilisation particulière pour l'eau potable, il est intéressant de noter qu'à Windhoek, depuis plus de 25 ans que l'usine de traitement existe, il n'a jamais été signalé d'influence négative sur la santé humaine.

Conclusion

Les applications des projets de REUE sont multiples. Elles dépendent de nombreux facteurs que l'on peut regrouper en cinq classes :

- le contexte socio-économique : le type d'activité industrielle, le nombre et la densité de l'habitat, l'importance de l'agriculture, la présence d'usines de production d'énergie, etc.
- le contexte écologique : la quantité des ressources disponibles, la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, la sensibilité du milieu récepteur à l'eutrophisation et aux autres pollutions, le contexte hydrogéographique, etc. ;
- le niveau de traitement des eaux : à chaque niveau de traitement, on peut appliquer un usage différent ;
- la réglementation : elle limite les usages en fonction de la qualité de l'eau utilisée et donc de son niveau de traitement. Plus le niveau sanitaire est bon, plus les applications autorisées seront nombreuses ;
- l'acceptation par la population : ce dernier aspect n'est pas à négliger. L'idée de réutiliser des eaux usées peut avoir un impact psychologique négatif sur la population. On peut faire le parallèle avec le problème des boues de stations d'épuration, qui crispe actuellement l'opinion. Il faut donc bien informer la population des risques et des avantages de la REUE.

Les cas de maladies liées à la réutilisation des eaux ont toujours eu lieu à cause d'eaux non traitées ou de qualité douteuse. « Jusqu'à présent, il n'y a eu aucun incident reporté de contamination associée à une réutilisation des eaux maîtrisée » (Asano, 1998). De même, les personnels travaillant en station d'épuration ne présentent pas plus de maladies, si les précautions nécessaires sont prises (vaccination).

Pour les éléments traces, les doses potentiellement ingérées pour la plupart des usages sont beaucoup trop faibles pour poser un problème sanitaire. Seule la réutilisation agricole est susceptible de comporter un risque. A ce sujet, les études scientifiques, relayées par la réglementation, ne font pas état d'un niveau de risque vraiment préoccupant en l'état actuel des

connaissances. Cependant, étant donné l'incertitude qui règne parfois au sujet des effets à long terme de certains de ces composés, l'attention à leur sujet ne doit pas se relâcher.

En résumé, les différentes expériences conduites dans le respect des normes, sont très positives. Les seules réserves concernent la représentativité des indicateurs retenus pour le suivi de la qualité microbiologique des eaux réutilisées, tout comme pour l'eau potable. Le facteur majeur de maîtrise du risque est la maîtrise du traitement de l'eau (Asano, 1998). Il faut pour **chaque usage** déterminer **un niveau de traitement adapté** à l'exposition de la population et au risque sanitaire. On peut dresser une échelle approximative de l'exposition au risque en fonction de l'usage, par ordre décroissant : consommation humaine, baignade, agriculture, bassin d'agrément (pêche et bateau). Le traitement doit être fait en conséquence.

La réglementation

Tableau 16. Recommandations microbiologiques révisées de l'OMS pour le traitement des eaux usées avant utilisation en agriculture^a (Blumenthal et coll., 2000)

Catégories	Conditions de réutilisation	Groupes exposés	Techniques d'irrigation	Nématodes intestinaux ^b	Coliformes fécaux ^c	Traitements recommandés pour atteindre le niveau de qualité microbiologique
A	Irrigation sans restrictions					
	A1 Pour les cultures maraîchères consommées crues, les terrains de sports, les parcs publics ^g	Travailleurs, consommateurs, public	Toutes	$\leq 0,1^e$	$\leq 10^3$	Série de bassins de stabilisation bien conçus, réservoir de stockage et de traitement remplis séquentiellement, ou traitement équivalent (p. ex. traitement secondaire conventionnel suivi soit d'un lagunage tertiaire, soit d'une filtration et d'une désinfection)
B		B1 Travailleurs (mais pas les enfants < 15 ans), populations alentour	Par aspersion	≤ 1	$\leq 10^5$	Série de bassins de rétention dont un bassin de maturation ou un bassin séquentiel ou un traitement équivalent (p. ex. traitement secondaire conventionnel suivi soit par des lagunages tertiaires, soit une filtration)
	Irrigation restreinte.					
	B2 comme B1 Céréales, cultures industrielles, fourragères, pâturage et forêt ^f	B2 comme B1	Par rigole d'infiltration ou par gravité	≤ 1	$\leq 10^3$	Comme pour la catégorie A
C		B3 Travailleurs dont les enfants < 15 ans, population alentour	Toutes	$\leq 0,1$	$\leq 10^3$	Comme pour la catégorie A
	Irrigation localisée sur des cultures de la catégorie B s'il n'y a pas d'exposition des travailleurs ou du public	Aucun	Goutte-à-goutte, micro-jet, etc.	Pas de norme	Pas de norme	Pré-traitement nécessaire pour des raisons techniques liées à l'irrigation, mais pas moins qu'une sédimentation primaire

(a) Dans certains cas particuliers, les facteurs épidémiologiques, socio-culturels et environnementaux devront être pris en compte, et les recommandations modifiées en conséquence.
 (b) Moyenne arithmétique du nombre d'œufs/l. Les espèces considérées sont *Ascaris*, *Trichuris* et l'ankylostome ; la recommandation correspond aussi à une protection contre les protozoaires parasites.

(c) Moyenne géométrique^e du nombre/100 ml. La moyenne géométrique (G) est définie comme étant la racine Nième du produit des N termes d'une série statistique.

(d) Une limite plus restrictive (≤ 200 coliformes fécaux / 100 ml) est appropriée pour les pelouses publiques, comme les pelouses d'hôtels, avec lesquelles le public peut avoir un contact direct.

(e) Cette limite peut être augmentée à ≤ 1 œuf/l si (i) il fait chaud et sec et que l'irrigation de surface n'est pas pratiquée ou (ii) le traitement de l'eau contient aussi des traitements chimiothérapeutiques anti-helminthes.

(f) Dans le cas des arbres fruitiers, l'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la récolte, et aucun fruit ne doit être récolté au sol. L'irrigation par aspersion ne doit pas être utilisée.

Les différentes réglementations dans le monde

Les références : les recommandations de l’OMS et de l’USEPA

Le point de vue de l’OMS

Les recommandations de l’OMS sont les seules à l’échelle internationale. Elles sont source d’inspiration pour de nombreux pays à travers le monde, et notamment la France.

L’OMS a demandé en 1982 à trois équipes indépendantes de chercheurs de fournir une base scientifique pour établir ces recommandations. Cela a abouti en 1989 au “Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture” ou “Recommandations sanitaires pour l’utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture”. Elles ont été révisées en 2000 par Blumenthal *et coll.* en intégrant les résultats de nouvelles études épidémiologiques. Pour établir les nouvelles normes, Blumenthal a utilisé deux approches : d’une part, des études épidémiologiques empiriques complétées par des études microbiologiques concernant la transmission des germes pathogènes et, d’autre part, une évaluation quantitative du risque basée sur un modèle applicable aux germes pathogènes choisis. Cette approche combinée a permis d’obtenir un outil puissant pour établir des recommandations, avec un rapport coût/efficacité avantageux et une garantie de protection de la santé publique. Cette révision a affiné les normes de l’OMS. Les modifications ont essentiellement porté sur la norme “œufs d’helminthes” qui pour certaines catégories est passée de 1 à 0,1 œuf/l.

Ces recommandations ne concernent que l’usage agricole, et il y a donc un “vide juridique” pour les autres usages. Les normes concernent uniquement les quantités de micro-organismes. Les protozoaires ne sont pas inclus directement car il est considéré qu’ils sont éliminés en même proportion que les helminthes. Les virus ne sont pas considérés non plus, leur présence étant difficile à détecter lors des contrôles de routine. Ces normes sont destinées à une utilisation internationale, et sont donc adaptées aux pays en voie de développement. Elles représentent la limite au-delà de laquelle la santé publique n’est plus assurée.

Le point de vue de l'USEPA

L'USEPA (United States Environmental Protection Agency) a publié en 1992, en collaboration avec l'USAID (United States Agency of International Development), ses propres recommandations sur la REUE, intitulées "*Guidelines for Water Reuse*". Contrairement à l'OMS, ces normes ne sont pas basées sur des études épidémiologiques et une estimation du risque, mais sur un objectif de **zéro pathogène** dans les eaux réutilisées. Les normes microbiologiques sont donc beaucoup plus strictes.

Les normes de l'USEPA concernent tous les usages envisageables pour des eaux usées épurées (usage urbain, agricole, industriel, recharge de nappe, etc.) ce qui en fait un outil puissant. Précisons que chaque État américain peut lui-même fixer ses propres recommandations, en s'inspirant plus ou moins de celles de l'USEPA. Ainsi, nous parlerons un peu plus bas des normes californiennes "Title 22" qui sont extrêmement sévères, et qui ont inspiré de nombreuses réglementations dans le monde.

Les recommandations de l'USEPA apparaissent en entier dans l'annexe 9. Plusieurs paramètres sont pris en compte : le pH, la Demande biologique en oxygène, la turbidité ou les solides en suspension et les coliformes fécaux. Il faut retenir que seul le facteur "coliformes fécaux" permet de juger de la qualité microbiologique.

Le pH est toujours fixé entre 6 et 9. La turbidité ne doit pas dépasser en général 2 NTU. La DBO maximale est fixée soit à 10 mg/l, soit à 30 mg/l, selon les usages. Les coliformes fécaux doivent être soit en concentration inférieure à 200 CF/100 ml (pour l'irrigation avec restriction, les usages paysagers, industriels et environnementaux), soit à un niveau de non-déteçtabilité (pour l'irrigation sans restriction, la baignade et la réutilisation indirecte pour l'eau potable). Enfin, ce qui est un des aspects les plus drastiques des normes de l'USEPA, dans la plupart des cas il est imposé une norme en chlore résiduel de 1 mg/l.

Retenons enfin que les recommandations concernant l'industrie et la réutilisation indirecte pour l'eau potable ne font pas état de normes précises, mais expliquent que les niveaux de qualité exigés doivent être fixés au cas par cas.

Comparaison

Les deux normes que nous venons de décrire s'opposent à plusieurs points de vue, et depuis quelques années, la polémique bat son plein entre les "pro-OMS" et les "pro-USEPA".

Une des différences entre OMS et USEPA concerne le traitement recommandé. Il est dit dans le document de l'OMS qu'un traitement extrêmement efficace peut être atteint par des bassins de stabilisation, alors que l'USEPA n'évoque que des traitements de désinfection tertiaire type chloration, ozonation, etc. Les modes de contrôles varient aussi : l'OMS préconise de contrôler le nombre de nématodes, alors que l'USEPA recommande de contrôler les systèmes de traitement et le comptage des coliformes totaux sert à lui seul à contrôler la qualité microbiologique.

En général, l'OMS est taxée d'être trop laxiste, et l'USEPA de préconiser des traitements trop chers et trop technologiques, inaccessibles aux pays en voie de développement. Les normes de l'OMS sont-elles suffisantes ? Cette question est au cœur du débat actuel sur la réglementation. Dans tous les cas de figure, la sévérité des normes imposées par l'USEPA est une barrière pour leur développement à travers le monde. Il faut noter que pour beaucoup de pays en voie de développement, où l'irrigation avec des eaux usées non traitées se pratique régulièrement, l'application des normes de l'OMS, qui autorisent un traitement extensif type lagunage et qui n'exigent pas une trop grande qualité, serait déjà un progrès considérable.

Une étude extrêmement intéressante a été réalisée par Shuval *et coll.* (1997) Les auteurs ont comparé le coût et l'efficacité des recommandations des deux institutions dans le cas de l'irrigation de légumes consommés crus et irrigués par des eaux épurées. Dans ce cas de figure, les normes sont :

- OMS : moyenne de 1000 CF/100 ml et <1 œuf d'helminthes/l
- USEPA : taux de coliformes fécaux non détectable, DBO \leq 10 mg/l, turbidité \leq 2 NTU, chlore résiduel de 1 mg/l.

L'expérience consistait à calculer le risque de contracter l'hépatite A ou le choléra en consommant des légumes arrosés par de l'eau traitée selon les normes de l'OMS.

Tableau 17. Risque d'être infecté et de contracter l'hépatite A en mangeant 100 g (3 feuilles) de laitue à grande feuille irriguée avec des effluents traités selon les standards de l'OMS pour une irrigation sans restriction des végétaux

Dose infectante moyenne	Risque pour une seule consommation de 100 g		Risque annuel pour une consommation de 100g/jour pendant 150 jours	
	PI ^a	PM ^b	PI	PM
DI ₅₀ = 30	4,6.10 ⁻⁸	2,3.10 ⁻⁸	6,9.10 ⁻⁶	1,7.10 ⁻⁶
DI ₅₀ = 1 000	1,5.10 ⁻¹⁰	7,5.10 ⁻¹⁰	2,2.10 ⁻⁷	5,0.10 ⁻⁸

(a) PI : probabilité d'être infecté

(b) PM : probabilité de tomber malade

Tableau 18. Risque d'être infecté et de contracter le choléra en mangeant 100 g de concombres ou 100 g de laitues à grande feuille (3 feuilles) irriguées avec des effluents bruts ou traités selon les recommandations de l'OMS

Type d'eaux usées	Type de végétaux	Risque d'infection PI	Risque de tomber malade PM
Brutes	Concombre	1,5.10 ⁻⁶	7,5.10 ⁻⁷
Brutes	Laitue	1,5.10 ⁻⁴	7,5.10 ⁻⁵
Traitées	Concombre	1,5.10 ⁻¹⁰	7,5.10 ⁻¹⁰
Traitées	Laitue	1,5.10 ⁻⁸	7,5.10 ⁻⁹

Pour savoir si ces risques sont acceptables, Shuval *et coll.* se sont référés à l'USEPA qui, dans ses recommandations concernant l'eau destinée à la consommation humaine, établit que les normes de potabilité devraient être telles que les populations humaines ne soient pas exposées à un risque de contracter une maladie entérique supérieur à 10^{-4} (soit un cas pour 10 000 personnes). Comparées à ce critère, les recommandations de l'OMS sont plus rigoureuses d'une ou deux magnitudes.

Puis Shuval *et coll.* ont effectué une **analyse de coût**. Pour une ville théorique du tiers-monde d'un million d'habitants qui souhaite construire des installations en vue d'une REUE à usage agricole, les coûts estimés selon qu'elle respecte les normes de l'OMS ou de l'USEPA sont :

- Recommandations OMS (1 000 CF/100 ml) : 0,10 \$/m³, soit 10 \$ par personne et par an (100 m³/p/an)
- Recommandations USEPA (0 CF/100 ml) : 0,45 \$/m³, soit 44 \$ par personne et par an (100 m³/p/an)

Donc le coût annuel pour la ville si elle respecte les normes de l'OMS est 10 000 000 \$/an et si elle respecte les normes de l'USEPA, le coût est de 45 000 000 \$/an, soit 35 000 000 \$/an de plus. Si l'on considère que :

- la moitié de la population (500 000 personnes) consomme régulièrement des végétaux irrigués avec des eaux épurées ;
- le risque de contracter l'hépatite A en suivant les règles de l'OMS est de $1,7 \cdot 10^{-6}$ (le pire des cas), soit environ une personne contaminée par an pour 500 000 personnes ;
- le risque de contracter l'hépatite A en suivant les règles de l'USEPA est nul (aucune personne contaminée par an pour 500 000 personnes).

Alors, on constate qu'en suivant les recommandations de l'USEPA, un seul cas d'infection à l'hépatite A a été évité. Le coût du traitement supplémentaire pour éviter ce cas d'infection est de 35 000 000 \$. Shuval s'interroge logiquement : "On peut donc se demander si le traitement additionnel [...] est justifié pour réduire encore le niveau de risque, déjà négligeable". De plus, si on considère l'hypothèse la plus optimiste (soit un risque de $5 \cdot 10^{-8}$ de contracter l'hépatite A en suivant les normes de l'OMS), le gain en terme de réduction des risques est quasi nul, pour une dépense annuelle supplémentaire de 35 000 000 \$!

Et Shuval de conclure : “On peut se demander si les traitements supplémentaires [...] requis pour suivre les recommandations de l’USEPA, plutôt que celles de l’OMS qui permettent un niveau de risque très bas, sont justifiés étant donné le faible degré de protection supplémentaire qu’elles fourniraient”.

Il semble cependant nécessaire de compléter les normes de l’OMS, notamment de leur adjoindre des normes chimiques, et de les étendre à d’autres usages qu’agricoles. De plus, le débat qui fait rage maintenant depuis plusieurs années entre les “pro-OMS” et les “pro-USEPA”, indique le besoin d’une norme internationale mise à jour qui puisse faire référence (Bontoux, 1997). A ce sujet, le site Internet de l’OMS (www.who.int) indique que de nouvelles réévaluations sont en cours et donneront lieu à une nouvelle publication courant 2004.

Une lacune au niveau européen

L’Union Européenne accuse un retard énorme en terme de législation sur la réutilisation des eaux usées épurées, puisqu’elle se limite à cette phrase de l’article 12 de la directive CEE numéro 91/271 de 1991 sur les eaux usées, qui établit que “des eaux usées traitées devront être réutilisées quand ce sera approprié”. (Bontoux, 1997). Cette lacune n’a pas empêché les pays membres d’adopter leur propre réglementation, mais elle a empêché l’unité européenne. En effet, aujourd’hui, certains pays comme l’Italie s’inspirent des normes américaines, et d’autres, comme la France, des normes de l’OMS.

Les avantages d’une réglementations européennes sont pourtant nombreux, entre autres :

- inciter l’OMS à mettre à jour sa réglementation et à l’améliorer ;
- augmenter la respectabilité du recyclage des eaux usées et l’intégrer dans les standards de la gestion des eaux ;
- la création d’un front européen unique pour l’importation de cultures irriguées avec des eaux usées ;
- l’élimination de rumeurs alarmistes au sein de l’UE à cause de mauvaises pratiques de traitements ;

- le développement de la REUE comme une mesure de protection environnementale, sans besoin de ressources en eau supplémentaires.

Les pays d'Europe qui ont une réglementation sont l'Italie, l'Espagne et la France (Junger, 2000). L'Italie est la première à s'être dotée d'une réglementation, en 1977, qui suit dans les grandes lignes l'approche californienne. Cependant, en 1989, en Sicile, une réglementation régionale a pris une nouvelle approche, plus proche de celle de l'OMS.

A titre d'exemples, les valeurs guides andalouses sont présentées dans le Tableau 19. Le cas français est décrit en détail dans la partie suivante.

Tableau 19. Normes andalouses (Espagne) pour la réutilisation des eaux usées épurées

Type de normes	Application	Coliformes fécaux pour 100 ml	Œufs de Nématodes pour 1 l.
1	Irrigation de terrains de sports et de parcs avec un accès public	< 200	< 1
2	Végétaux consommés crus	< 1 000	< 1
3	Production de biomasse destinée à la consommation humaine et à la réfrigération en circuit ouvert	< 1 000	Aucune norme
4	Bassins d'agrément	< 2 000	< 1
5	Réfrigération en circuits semi-fermés	< 10 000	Aucune norme
6	Cultures industrielles, céréales, semences sèches de cultures fourragères, forêt et végétaux mis en conserve ou cuits	Aucune norme	< 1
7	Espaces verts sans accès au public, production de biomasse non destinée à la consommation humaine, bassins d'agrément avec un accès réglementé	Aucune	Aucune

Source : Junger, 2000

Tableau 20. Critères de traitements et de qualité pour un usage non potable d'eaux usées récupérées de l'État de Floride

Type d'usage	Limites de qualité	Traitement requis
Espaces publics à accès restreint ^a , usages industriels	- 200 coliformes fécaux/100 ml - MES : 20 mg/l - DBO: 20 mg/l	Traitement secondaire et désinfection
Espaces publics ^b , irrigation de cultures ^c , chasses de toilettes ^d , bassin d'agrément ^e , protection anti-incendie, usages esthétiques, contrôle de la poussière	- Niveau non détectable de coliformes fécaux/100 ml - 5 mg/l de MES - 20 mg/l DBO	Traitement secondaire, filtration & désinfection.

(a) Gazonnières, forêts, pâturage, pépinières, production de fibres végétales, cultures semences et espaces similaires.

(b) Pelouses résidentielles, parcours de golfs, cimetières, parcs, espaces paysagers, bordures d'autoroutes et espaces similaires.

(c) Autorisée seulement si les plantes sont épluchées, cuites ou subissent un traitement thermique avant la consommation.

(d) Autorisée seulement là où les résidents n'ont pas accès au système de plomberie. Interdit dans les maisons individuelles.

(e) Pour les bassins où tout le corps est exposé (baignade), les eaux récupérées doivent suivre les normes bactériologiques de l'eau potable si elles constituent plus de 50 % de l'approvisionnement du bassin.

Source : Crook et Surampalli, 1996

Autres réglementations

États-Unis

Aux États-Unis, l'USEPA fixe un cadre réglementaire, qui est ensuite décliné avec des variations plus ou moins importantes dans les différents états. Aujourd'hui, 34 états américains ont une réglementation. Elles sont souvent strictes, les plus sévères étant celles de l'Arizona, de la Floride, de la Californie, du Texas et l'État de Washington.

En Floride, la REUE est très développée. Ainsi, 50 % de sa capacité totale de traitement est réutilisée. Les usages privilégiés sont l'aménagement paysager, l'agriculture, l'industrie et la préservation de zones humides.

La Californie est également un état où la REUE est extrêmement développée. La première réglementation à ce sujet date de 1918 ! Cet état récupère 10 % de ses eaux usées. La loi stipule qu'aucune personne ni aucun organisme ne peut utiliser de l'eau potable à des fins autres que la consommation si de l'eau récupérée propre aux fins recherchées est disponible. La réglementation californienne, exprimée dans un document appelé "Title 22" est une des plus sévères au monde. Elle est basée sur une approche de haute technologie et repose sur le principe du "*better safe than sorry*". C'est également une référence mondiale, au même titre, voire plus, que les recommandations de l'USEPA. Elle a servi de modèle aux réglementations d'Israël, de l'Italie, etc. Comme on peut le voir dans le tableau 21, la limite maximale admise en coliformes fécaux est de 23 CF/100 ml, valeur qu'il est intéressant de comparer avec les 1000 CF/ 100 ml préconisés généralement par l'OMS.

Tableau 21. Résumé des recommandations de l'État de Californie pour la REUE

Applications de la REUE	Techniques d'irrigation	Coliformes fécaux ou totaux ^b	Traitements des eaux usées requis	
Cultures comestibles	Par aspersion	< 2,2/100 ml ^a	Traitement secondaire, coagulation, clarification, filtration et désinfection	
Cultures comestibles	Surface	< 2,2/100 ml ^a	Traitement secondaire et désinfection	
Arbres fruitiers et vigne	Surface	Aucune limite	Traitement primaire	
Cultures fourragères, production de fibres végétales et cultures semences	Surface ou par aspersion	Aucune limite	Traitement primaire	
Pâturage pour animaux élevés pour leur lait	Surface ou par aspersion	< 23/100 ml ^a	Traitement secondaire et désinfection	
Parcours de golfs, cimetières, bordures de routes et autres espaces avec un accès public similaire	Surface ou par aspersion	< 23/100 ml ^{a, c}	Traitement secondaire et désinfection	
Parcs, jardins publics, aires de jeux, cours d'école et autres espaces similaires	Surface ou par aspersion	< 2,2/100 ml ^a	Traitement secondaire, coagulation, clarification, filtration et désinfection	
<hr/>				
Autres usages	Bassin d'agrément sans restriction d'usage	-	< 2,2/100 ml	Traitement secondaire, désinfection, oxydation
	Bassin paysager	-	< 23/100 ml	Traitement secondaire, désinfection, oxydation
	Recharge de nappe	-	d	d

(a) Les critères californiens de réutilisation des eaux usées épurées sont exprimés comme la médiane du nombre de coliformes totaux pour 100 ml, déterminée à partir d'analyses bactériologiques réalisées les 7 derniers jours.

(b) La concentration en coliformes ne doit pas excéder 23 pour 100 ml dans plus d'un échantillon sur une période de 30 jours.

(c) La concentration en coliforme ne doit pas excéder plus de 240 pour 100 ml dans plus d'un échantillon sur une période de 30 jours.

(d) Chaque projet est examiné individuellement par les services de santé de l'État de Californie.

Source : Asano (1998) et Bontoux (1997)

Autres pays anglo-saxons

En Australie, 11 % des eaux urbaines sont récupérées. La réglementation définit des niveaux pertinents de qualité correspondant à chaque application, suivant cinq niveaux d'exposition, du libre accès à l'accès restreint. Cependant, en l'absence de directives d'État, les autorisations sont encore souvent obtenues au cas par cas, après autorisation des instances appropriées (Marsalek, 2002). Les États qui ont des directives fixes sont :

- les Nouvelles-Galles du Sud, pour l'utilisation industrielle, le pâturage, l'irrigation des cultures et des forêts, l'irrigation des aménagements paysagers en milieu urbain, l'alimentation de nappes souterraines ;
- l'Australie méridionale, pour les usages agricole, municipal et résidentiel, environnemental, industriel.

Au Canada, il n'existe aucune réglementation nationale. Seuls quelques États en ont mis en place, notamment :

- la Colombie-Britannique : 3 % des eaux usées sont réutilisées. Les utilisations sont regroupées en deux catégories : activités d'accès public non restreint (irrigation de parcs, chasse de toilettes, agriculture, fabrication de neige) qui nécessitent un traitement élevé, et activités d'accès public restreint (gazon, fabrication du béton, tour de refroidissement) qui nécessitent un traitement moins élevé.
- l'Alberta : usage pour irrigation des golfs, espaces verts urbains, bois et terres agricoles de produits non consommables s'ils ne sont pas transformés.

Tableau 22. Utilisations permises et normes à suivre concernant l'eau récupérée (selon le ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie britannique, 1999)

Utilisations permises	Exigences relatives au traitement	Exigences relatives à la qualité de l'effluent	Exigence relative à la fréquence des contrôles
L'accès public non restreint – utilisations agricoles, récréatives et urbaines	Secondaire, avec ajout de produit chimique, filtration, désinfection et stockage d'urgence	DBO ₅ ≤ 10 mg/l Turbidité ≤ 2 UTN Coliformes fécaux ≤ 2,2/100 ml PH = 6 à 9 Plus d'autres facteurs généraux	Hebdomadaire En continu Quotidien
L'accès au public restreint – utilisation agricole, urbaines, récréatives ou à des fins de construction, utilisation industrielles et environnementales	Secondaire, avec désinfection	DBO ₅ ≤ 45 mg/l Total des solides en suspension ≤ 45 mg/l Coliformes fécaux ≤ 200/100 ml PH = 6 à 9 Plus d'autres facteurs généraux	Hebdomadaire Quotidien Hebdomadaire Hebdomadaire

Source : Marsalek, 2002

Tableau 23. Normes de qualité relatives aux effluents traités servant à l'irrigation au moyen d'eaux usées (ministère de l'Environnement de l'Alberta, 2000)

Utilisations permises	Exigences relatives au traitement	Exigences relatives à la qualité de l'effluent	Exigence relative à la fréquence des contrôles
Irrigation conventionnelle à l'aide d'eaux usées, utilisation restreinte et non restreinte	La meilleure forme de traitement possible pour fournir un effluent de la qualité exigée (principalement lors d'un traitement secondaire avec désinfection)	DBO ≤ 100 mg/l	Semestriel
		DCO < 150 mg/l	Semestriel
		TSS < 100 mg/l	Semestriel
		CE ^a :	
		- < 1,0 dS/m pour utilisation non limitée	Semestriel
		- de 1,0 à 2,5 dS/m pour une utilisation limitée	
		- > 2,5 inacceptable	
		RAS ^b :	
		- < 4 pour un usage non restreint	Semestriel
		- de 4 à 9 pour un usage restreint	
EC > 1,0 dS/m			
- > 9 inacceptable			
PH = 6,5 à 8	Semestriel		
Total des coliformes < 1000/100 ml	Moyenne		
Coliformes fécaux < 200/100 ml	d'échantillonnage ^c		

(a) conductivité électrique

(b) rapport d'adsorption du sodium

(c) moyenne géométrique hebdomadaire ou quotidienne, selon qu'il y ait stockage ou non

Source : Marsalek, 2002

La législation française et les recommandations du CSHPF

La réglementation française sur la réutilisation des eaux usées épurées ne concerne que la réutilisation agricole. Il y a donc une lacune réglementaire concernant les autres usages. Les recommandations établies par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France en 1991 sont largement inspirées de celles de l'OMS, avec quelques précautions supplémentaires.

Le contexte réglementaire

La réglementation française est assez succincte concernant la réutilisation des eaux usées épurées. Les textes de lois relatifs à l'eau et à l'assainissement sont :

- la loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964, fondatrice des Agences de l'eau ;
- la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992, bien connue du grand public sous l'appellation loi sur l'eau de 1992, qui établit les SDAGE (schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) et les SAGE (schéma d'aménagement des eaux), ainsi que les régimes de déclaration et d'autorisation pour les ouvrages et les activités ayant trait à l'eau ;
- les décrets n° 93-742 du 29 mars 1993, n° 93-743 du 29 mars 1993 et n° 94-469 du 3 juin 1994 ; dans ce dernier, l'article 24 fait entièrement référence à la réutilisation agricole des eaux usées ; le voici en entier :
“ Art. 24. - Les eaux usées peuvent, après épuration, être utilisées à des fins agronomiques ou agricoles, par arrosage ou par irrigation, sous réserve que leurs caractéristiques et leurs modalités d'emploi soient compatibles avec les exigences de protection de la santé publique et de l'environnement. Les conditions d'épuration et les modalités d'irrigation ou d'arrosage requises, ainsi que les programmes de surveillance à mettre en oeuvre, sont définis, après avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France et de la mission interministérielle de l'eau, par un arrêté du ministre chargé de la santé, du ministre chargé de l'environnement et du ministre chargé de l'agriculture. ”
- les deux arrêtés du 22 décembre 1994 relatifs aux prescriptions techniques et à la surveillance des ouvrages de collectes et de traitement des eaux usées.

Le texte de 1964 donne aux préfets le pouvoir de refuser un plan de rejet d'eaux usées épurées à l'intérieur des périmètres de protection ; cette notion comprend le fait de les épandre sur des cultures. L'autorisation de rejet (ou d'épandage) est accordée en prenant en compte les caractéristiques du milieu extérieur. Avant les recommandations du CSHPF, l'utilisation des eaux usées en agriculture était donc autorisée au cas par cas. Les préfets n'avaient aucune réglementation sur laquelle s'appuyer, ce qui peut expliquer en partie les débuts timides de la réutilisation des eaux usées épurées en France.

Remarque : la législation est bien plus fournie en ce qui concerne la réutilisation des boues de stations d'épuration.

Les recommandations du CSHPF

Le CSHPF a émis ses recommandations en fonction de deux axes complémentaires : la protection des ressources en eau et la sécurité sanitaire. Selon lui, l'intérêt de la REUE est double car elle permet de suffire à une pénurie locale et temporaire de la ressource qui peut avoir lieu dans certaines régions, et parce qu'elle permet dans certains cas une amélioration de la qualité des eaux souterraines et superficielles.

Le CSHPF soulève par ailleurs le problème de l'absence de réglementation concernant l'irrigation avec des eaux superficielles qui ne sont soumises à aucune restriction, et dont certaines ont parfois des niveaux de qualité inférieurs à ceux exigés pour les eaux épurées. De même il s'inquiète de l'importation de produits maraîchers arrosés avec des eaux usées venus de pays où les "contraintes sanitaires [...] sont loin d'être respectées". Une solution à ces questions serait souhaitable au niveau européen.

Au vu de l'état actuel des connaissances, le CSHPF donne un **avis favorable** à la réutilisation des eaux usées épurées destinée à l'agriculture et à l'arrosage, sous réserves du respect de certaines consignes concernant les points suivants :

- la protection des ressources en eau souterraine et superficielle ;
- la restriction des usages en fonction de la qualité des effluents épurés ;
- le réseau de canalisation d'eaux usées épurées ;

- la qualité chimique des effluents épurés ;
- le contrôle des règles d'hygiène applicables aux installations d'épuration et d'irrigation ;
- la formation des exploitants et des contrôleurs.

La protection des ressources en eau souterraines et superficielles

L'autorisation préfectorale - délivrée en application du décret n° 73-218 du 23 février 1973 pris en application de la loi n° 64-125 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux - doit être requise pour tout projet d'utilisation d'eaux usées urbaines. L'étude accompagnant la demande d'autorisation devra aborder les points suivants : les caractéristiques du site (topographie, géologie, pédologie, climat, etc.), les caractéristiques du projet d'irrigation (caractéristiques des eaux usées, fréquence et conditions d'apport, devenir des eaux usées en dehors des périodes d'utilisation pour l'irrigation, etc.) et les autres exutoires possibles. Si la REUE permet l'amélioration de la protection des ressources en eaux superficielles (par détournement d'un rejet de station d'épuration par exemple), l'étude d'impact doit comporter les informations permettant d'apprécier ces améliorations.

L'arrêté permet de définir les débits journaliers autorisés, les périodes d'irrigation, le niveau de qualité du rejet, la fréquence des contrôles, les distances à respecter vis-à-vis des berges de cours et plans d'eau.

Cet arrêté ne concerne pas les stations inférieures à 500 EH, sauf dans des zones vulnérables (zones karstiques par exemple). Pour les cas où l'autorisation préfectorale n'est pas obligatoire, les projets de REUE devront tout de même se soumettre à l'approbation des autorités sanitaires départementales. De plus, il est demandé d'interdire les projets de REUE dans les périmètres de protection immédiate et rapprochée des points de prélèvements d'eauⁱ destinée à produire de l'eau d'alimentation.

ⁱ Eaux souterraines

Tableau 24. Les recommandations du CSHPF

Catégorie	Normes ^a	Type de culture	Type d'irrigation	Traitement
A	- Œufs d'helminthes ≤ 1/litre - Coliformes thermotolérants ≤ 1 000/100 ml	- Irrigation de légumes consommés crus - Arrosage de terrains de sport et d'espace verts ouvert au public	- Irrigation gravitaire, arrosage sous frondaison - Irrigation par aspersion sous certains conditions ^b	Un traitement efficace peut être atteint par une série de bassins de lagunage naturel, pour un séjour de 30 jours avec un ensoleillement suffisant, ou tout autre traitement similaire
B	Œufs d'helminthes ≤ 1/litre	- Vergers, cultures céréalières et fourragères, pépinières et cultures de végétaux consommables après cuisson (pommes de terres, betteraves, choux...) - Terrain de sport s'ils sont utilisés plusieurs semaines après l'arrosage	- Irrigation gravitaire ou à la raie - Irrigation par aspersion sous certains conditions ^c	Un traitement efficace peut être une série de bassin de décantation pendant une dizaine de jours, ou tout autre procédé ayant une efficacité équivalente
C	Aucune	- Céréales, cultures industrielles et fourragères, vergers et zones forestières, - Espaces verts non ouverts au public	- Irrigation souterraine ou localisée - Irrigation par aspersion	Épuration préalable nécessaire pour des raisons d'ordre technique

(a) le CSHPF précise dans ses recommandations complémentaires de 1992 qu'il s'agit de valeurs impératives qui ne doivent être dépassées en aucun cas.

(b) l'irrigation par aspersion est autorisée si :

- elle est réalisée en dehors des heures d'ouverture au public,
- les asperseurs sont de faible portée,
- l'aspersion est réalisée à une distance suffisante des habitations, des zones de sport et de loisir, prenant en compte les conditions climatiques locales (100 m minimum).

(c) l'irrigation par aspersion est autorisée si :

- l'aspersion est réalisée à une distance suffisante des habitations, des zones de sport et de loisirs, prenant en compte les conditions climatiques locales (100 m minimum),
- des écrans ou des obstacles (arbres) sont mis en place qui limitent la propagation des aérosols et si l'arrosage direct des voies de communication est évité,
- la protection des personnels d'exploitation contre les risques d'inhalation des aérosols est suffisamment assurée.

La restriction des usages en fonction de la qualité des effluents épurés

Le CSHPF tient pour population particulièrement exposée les travailleurs agricoles, les consommateurs et les populations vivant à proximité des zones d'irrigation. Afin de protéger ces populations, les contraintes doivent porter sur le type de culture et le niveau de traitement. Le mode d'irrigation "joue[e] également un rôle de tout premier plan". Ainsi, l'irrigation par aspersion ne sera tolérée qu'en dernier recours. Les projets limitant les contacts entre le public et l'eau ainsi que la contamination de la chaîne alimentaire seront favorisés.

Le CSHPF se réfère aux recommandations de l'OMS de 1989 (qui ont été modifiées depuis, cf. § 1.1.1.1.). Trois catégories de contraintes sanitaires (A, B, C) sont définies (cf. tableau 24).

Les réseaux de canalisations d'eaux usées épurées

Le réseau d'eaux usées épurées sous pression doit se conformer au règlement sanitaire départemental concernant les réseaux d'eau non potable. Toute connexion entre le réseau d'eau épurée et le réseau d'eau destinée à la consommation humaine doit donc être évitée. De plus, l'accès au réseau doit être inaccessible au public et à toute personne étrangère au service d'exploitation.

La qualité chimique des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures

La qualité chimique des eaux épurées est en fait déduite des analyses de qualité des boues qui sont produites par la station d'épuration. Si ces dernières respectent la norme NFU 44041 relative aux métaux lourds dans les eaux usées, alors les eaux sont considérées comme non dangereuses d'un point de vue chimique. Cette norme est logique puisqu'on rappelle que les boues contiennent "naturellement" plus de métaux lourds et de micro-polluants que les eaux usées, car ces éléments traces sont facilement éliminés par les traitements de décantation et se retrouvent donc en majorité dans les boues.

Les normes du CSHPF concernant tout particulièrement les eaux usées urbaines d'origine domestique, les eaux usées industrielles, plus chargées en produits chimiques, ne sont *a priori* pas concernées. Cependant, dans le cas où une industrie déverserait ses eaux usées dans le

réseau collectif, une réutilisation de ces eaux après traitement est possible, sous réserve d'un examen particulier de leur qualité chimique : dans certains cas, elle pourra être interdite. Pour aider à la décision, le dossier de demande d'autorisation devra comporter des informations précises sur :

- la nature et l'importance des produits industriels déversés dans le réseau d'assainissement ;
- les effluents traités : analyse des paramètres globaux de pollution (MES, DBO₅, DCO, NTK), des métaux lourds visés dans la norme NFU 44041 et les substances organiques susceptibles d'être rencontrées en quantité importante ;
- les boues produites par la station d'épuration (normes NFU 44041).

Il est important également de mesurer régulièrement les quantités en substances nutritives (N, P, K) afin d'adapter les apports aux paramètres agronomiques et d'éviter les apports excessifs d'azote.

Le contrôle des règles d'hygiène applicables aux installations d'épuration et d'irrigation

Le CSHPF propose que **tous** les projets de REUE de niveau A (cf. tableau 24) soient soumis à autorisation préfectorale, et pas seulement ceux visés par la loi sur l'eau de 1964, ceci essentiellement afin de vérifier que les conditions sanitaires sont respectées. De plus cette obligation pourra jouer un rôle d'information et de conseil auprès des exploitants.

Le contrôle des ouvrages d'épuration doit être réalisé par les DDASSⁱ, en s'appuyant éventuellement sur les SATESEⁱⁱ. Les contrôles devront porter sur les **paramètres microbiologiques** et sur les **substances nutritives** et devront avoir lieu au moins une fois par trimestre. De plus, si l'effluent est utilisé pour irriguer des végétaux destinés à la consommation humaine ou animale, les taux en **nickel** et en **cadmium** devront être systématiquement mesurés. La recherche d'autres micro-polluants sera effectuée en fonction de la nature des déversements en amont.

ⁱ Direction départementale des affaires sanitaires et sociales

ⁱⁱ Service d'assistance technique aux exploitants de stations d'épuration

Le contrôle des règles d'hygiène fixées en irrigation sera également assuré par les DDASS.

Le contrôle des végétaux, et notamment de la dose de cadmium, devra être réalisé par « les services compétents ».

Pendant cinq ans, les DDASS devront faire un bilan périodique du projet de REUE et le soumettre au Conseil Départemental d'Hygiène et si nécessaire au CSHPF. Les autorisations des projets ne respectant pas les recommandations du CSHPF pourraient alors être retirées.

De plus, dans ses recommandations supplémentaires de 1992, le CSHPF précise que :

- la fréquence d'échantillonnage doit être d'au moins une fois toutes les deux semaines dans l'année qui précède l'utilisation effective des eaux usées et pendant la première période d'utilisation ;
- si un dépassement est constaté, une deuxième mesure doit être effectuée immédiatement. Si le résultat est confirmé, une enquête sanitaire a lieu qui peut demander l'arrêt temporaire ou définitif de la REUE ;
- si pendant la première période d'utilisation la totalité des résultats d'analyse ont été conformes et s'il n'y a eu aucun élément de nature à modifier la composition des eaux usées, alors la fréquence de contrôle peut être divisée par deux.

La formation des exploitants et des contrôleurs

Les personnels d'exploitation, les agents chargés du contrôle ou de l'assistance technique aux exploitants de station d'épuration et éventuellement les agents de laboratoire agréés devront recevoir une formation adaptée (hygiène, risque sanitaire, qualité des eaux, auto-contrôle, analyse...).

Conclusion

Nous concluons cette partie à partir des commentaires de Cauchi (1996) sur ces recommandations, qui posent un certain nombre d'interrogations :

- A propos du stockage, qui n'est pas du tout évoqué dans les recommandations du CSHPF : si le stockage est de longue durée, les normes sanitaires doivent-elles s'appliquer aux effluents de la sortie de station ou à ceux de la sortie de stockage ? Autrement dit, doit-on considérer que le stockage fait partie du système d'épuration ou du système d'irrigation ?
- L'absence de méthodes de contrôles normalisées est problématique, surtout pour les œufs d'helminthes, qui sont souvent confondus avec les larves par exemple. De même, il faudrait mieux définir les procédures et les lieux d'échantillonnage, ainsi que les modalités des financements de ces contrôles.
- Que faire des eaux usées qui ne sont pas conformes ? Elles doivent être rejetées dans le milieu naturel, mais que faire si la REUE a été mise en place pour protéger les eaux superficielles ? Il semble important de prévoir dans les projets de REUE une solution de secours en cas de non-conformité. De plus, si la non-conformité entraîne la non-utilisation des eaux épurées pour l'irrigation, il ne sera plus possible de faire face aux besoins de l'exploitation agricole. Là aussi il faudrait prévoir une solution de secours.
- Quelle est la viabilité financière de ces projets ? Le niveau de traitement recommandé et le caractère impératif des normes implique des installations très fiables et donc coûteuses. Cependant, l'évaluation de la viabilité économique doit prendre en compte les économies réalisées par la diminution des prélèvements directs ainsi que les mesures de protection du milieu récepteur qui ne doivent plus être mis en œuvre.

Faisabilité en Île-de-France

Figure 5. Plan d'étude d'un projet de réutilisation des eaux usées épurées

<p style="text-align: center;">Objectif</p> <p>Mobilisation d'une ressource en eau supplémentaire</p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p style="text-align: center;">Évaluation des ressources et des besoins en eau</p> <p>Les ressources</p> <ul style="list-style-type: none"> - capacité des réseaux de distribution existants, coûts de l'eau distribuée - réserve(s) exploitable(s), régularité, qualité, coûts de mobilisation <p>Les besoins</p> <ul style="list-style-type: none"> - besoins actuels et potentiels (eau potable, besoins municipaux hors eau potable, industrie, agriculture), en quantité et en qualité 	<p style="text-align: center;">Objectif</p> <p>Protection des milieux récepteurs</p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p style="text-align: center;">Évaluation des besoins en assainissement</p> <p>État actuel</p> <ul style="list-style-type: none"> - collecte des eaux usées (taux, qualité du réseaux) - épuration - qualité des milieux récepteurs <p>Les besoins</p> <ul style="list-style-type: none"> - besoins pour satisfaire aux réglementations relatives au traitement des eaux usées urbaines, et aux usages existants et potentiels des milieux récepteurs (objectif de qualité)
<p>Étude du « marché » des eaux usées</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inventaire des réutilisations existantes - Inventaire des usages potentiels des eaux usées : usages, localisations, quantités, qualités, contraintes - Approvisionnement alternatif en eau conventionnelle (coûts) - Enquête auprès des utilisateurs potentiels d'eaux usées - Information des utilisateurs potentiels 	
<p>Élaboration et étude de scénarios</p> <p><i>Pour chaque scénario</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Étude technique Étude des coûts Étude des impacts (positifs et négatifs) Étude économique 	
<p>Sélection</p> <ul style="list-style-type: none"> - au niveau d'une étude d'opportunité ou d'une étude de faisabilité <p style="text-align: center;">des scénarios pour études ultérieures plus détaillées</p> <ul style="list-style-type: none"> - au niveau d'une étude de faisabilité détaillé <p style="text-align: center;">du projet à réaliser</p>	

Source : Faby, 1997

Élaboration d'un projet de REUE

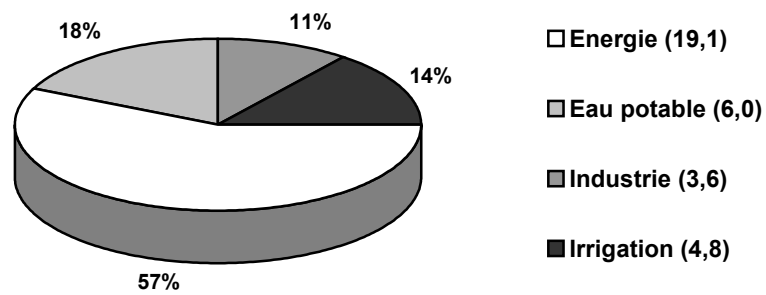
Faby (1997) propose un schéma pour étudier la faisabilité d'un projet de REUE dans une région donnée. Cette démarche comprend trois étapes : une étude d'opportunité, une étude de faisabilité et une étude de faisabilité détaillée. Ces trois études suivent le même schéma et répondent aux mêmes questions, mais de manière plus ou moins approfondie : ce **plan d'étude** est présenté dans la figure 5. Cette démarche en trois étapes est intéressante dans un contexte où la réutilisation des eaux usées épurées n'apparaît pas *a priori* évidente, car elle permet de « filtrer » assez vite les projets les plus réalistes et intéressants.

L'étude d'opportunité n'est pas très approfondie mais est absolument essentielle. Elle permet de dégager dans un contexte donné les principaux éléments qui peuvent justifier ou non la mise en place d'un projet de REUE. Elle ouvre les premières « pistes » qui seront analysées plus en détail dans les études ultérieures

L'étude de faisabilité reprend les conclusions et les scénarios dégagés dans l'étude d'opportunité afin de les analyser en détail, notamment d'un point de vue économique. Le coût de ces scénarios est comparé avec celui de scénarios sans réutilisation. Puis ils sont comparés entre eux, afin de sélectionner les plus appropriés. Ceux-ci sont alors soigneusement analysés dans **l'étude de faisabilité détaillée**.

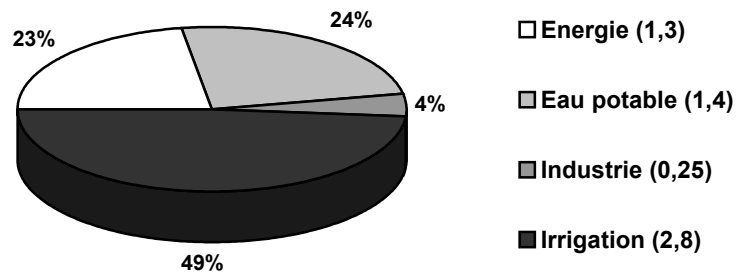
La REUE a un **double objectif** : elle permet d'une part de mobiliser une ressource en eau supplémentaire et d'autre part de protéger les milieux récepteurs. Comme l'explique Faby (1997), les eaux épurées, « au lieu d'être déversées dans le milieu récepteur ordinaire, rivière, lac, étang ou rivage, qu'elles polluent plus ou moins gravement, sont dérivées, après un traitement approprié, vers des usages qui sont le moyen ou l'occasion d'une élimination plus inoffensive de leur charge polluante résiduelle. » C'est donc à la fois une opération d'approvisionnement et d'assainissement. Pour déterminer l'opportunité d'un projet de REUE dans une région donnée, il faut donc bien évaluer les besoins en eau, les ressources en eau et le niveau de l'assainissement. Nous proposons dans les paragraphes suivants une étude d'opportunité à l'échelle de l'Île-de-France, ainsi que quelques scénarios envisageables. L'étude approfondie de chacun de ces scénarios devra se faire dans des études de faisabilité à l'échelle locale, et non plus à l'échelle de la région.

Figure 6. Répartition des volumes prélevés en France métropolitaine en 2001, en milliards de m³



Source : RNDE, 2001

Figure 7. Répartition des volumes consommés en France métropolitaine en 2001, milliards de m³



Source : RNDE, 2001

Évaluation des ressources et des besoins en eau en Île-de-France

Les ressources naturelles

Les précipitations

La **pluviométrie est modérée** en Île-de-France, avec une moyenne de 600 mm par an répartis sur 110 jours, contre une moyenne de 900 mm par an pour 120 jours en France. Il tombe tout de même plus de 8 milliards de m³ d'eau chaque année en Île-de-France. Les zones les plus sèches sont au Sud-Ouest de la région, les plus humides au Nord-Ouest et à l'Est (IAURIF, 2000).

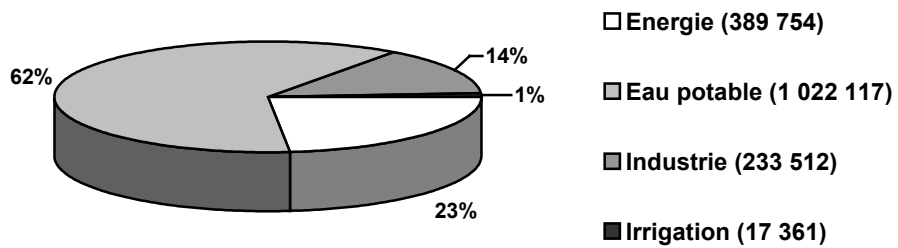
Les eaux de surface

L'Île-de-France est une région **riche en masses d'eau de surface**, que ce soit sous forme de lacs, d'étangs, de rivières ou de canaux. On y trouve environ 50 rivières, 100 ruisseaux et plus de 200 rus (AESN, 2002), qui totalisent une longueur de 7 000 km (IAURIF, 2000). Les rivières les plus importantes sont la Seine, la Marne et l'Oise. Elles sont toutes les trois largement exploitées pour l'approvisionnement en eau, et notamment en eau potable. On compte 14 200 ha de plans d'eau. Il existe 15 plans d'eau de plus de 50 ha, qui se doivent de suivre la directive cadre européenne sur l'eau n°2000/60/CE, c'est-à-dire atteindre un « bon état écologique » d'ici 2015 (AESN, 2002).

Il existe également des masses d'eau « non naturelles » classées en deux types selon la directive cadre européenne sur l'eau n°2000/60/CE. Ce sont :

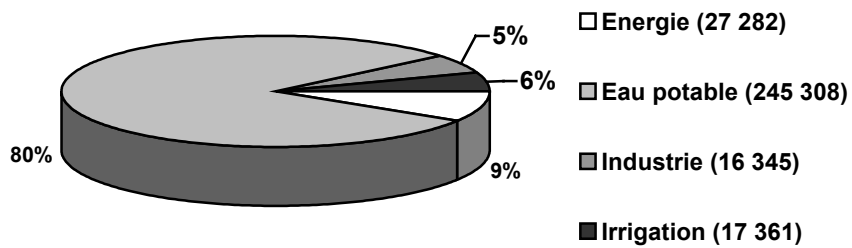
- les masses d'eau artificielles : une masse d'eau de surface créée par l'activité humaine. Il y a une présence importante de cours d'eau artificiels en Île-de-France, comme les canaux Saint-Martin, Saint-Denis, de l'Ourcq et du Loing, ainsi que les étangs et les rigoles qui drainent le plateau de Saclay et celui de Rambouillet à Versailles ;
- les masses d'eau fortement modifiées : une masse d'eau de surface qui, par suite d'altérations physiques dues à l'activité humaine, est fondamentalement modifiée. Les cours d'eau fortement modifiés sont principalement la Seine, la Marne et l'Oise (AESN, 2003).

Figure 8. Répartition des volumes prélevés par usage en 2001 en Île-de-France (10^3 m^3)



Source : RNDE, 2001

Figure 9. Répartition des volumes consommés par usage en 2001 en Île-de-France (10^3 m^3)



Source : RNDE, 2001

Les eaux souterraines

Les formations géologiques souterraines en Île-de-France sont de types sédimentaires. Ce type de roche permet en général la formation de vastes réserves d'eau. Il y a **11 masses d'eau souterraines** en Île-de-France. Elles ne respectent évidemment pas les limites administratives de la région, et la plupart débordent en dehors. Les noms donnés par l'Agence de l'Eau sont :

- la craie du Beauvaisis ;
- les sables et calcaires du Vexin français ;
- les sables et calcaires du nord de la Marne ;
- les calcaires de Champigny ;
- les sables de Fontainebleau des Yvelines ;
- les alluvions de la Seine moyenne ;
- la Bassée ;
- la craie du Sénonais ;
- la craie du Gâtinais ;
- les sables de l'Albien captif ;
- les calcaires de Beauce.

Les nappes qui présentent les enjeux les plus importants sont :

- la masse d'eau de la Beauce : elle a souffert d'un prélèvement agricole trop important et a connu une baisse exceptionnelle de son niveau. Une gestion raisonnée a donc été mise en place à partir de 1993/1994 ;
- la masse d'eau des calcaires de Champigny : elle alimente en eau potable la plupart des communes de la Brie. Sa qualité s'est dégradée, ce qui a conduit le Conseil régional à signer un contrat de nappe avec le Conseil général et l'Agence de l'eau en 1997. Une association d'usagers s'est créée (Aqui'Brie) avec pour objectif la protection et la reconquête de la qualité de la nappe ;
- la masse d'eau de l'Albien captif : elle a une qualité remarquable car elle est extrêmement bien protégée de la surface. Elle constitue une réserve de secours en cas de pollution des ressources superficielles ;
- la masse d'eau de la Bassée : elle est actuellement peu exploitée : c'est la dernière grande ressource régionale pour l'alimentation en eau des populations futures.

Tableau 25. Les grands chiffres de l'espace régional en 1994

Usage du sol	% (surface)
Bois	23,2
Cultures	53,1
Eau	1,2
Autre rural	2,6
Rural	80,1
Urbain ouvert	5,2
Habitat individuel	7,2
Habitat collectif	1,8
Activités	1,7
Équipements	1,5
Transports	2,2
Chantiers	0,3
Urbain construit	14,7
Total Île-de-France	100

(Source : IAURIF, 2000)

Les besoins actuels

Une activité humaine soutenue (domestique et industrielle) et une agriculture bien développée demandent beaucoup d'eau et pèsent sur le milieu naturel. Alors qu'en France métropolitaine, la plus grande part des prélèvementsⁱ revient à l'énergie et la plus grande part de la consommation à l'agriculture (cf. Figure 6 et 7), l'Île-de-France se singularise. En effet, c'est l'eau potable qui représente la plus grande partie des prélèvements et de la consommation (cf. Figure 8 et 9). Ceci peut être relié à la très forte urbanisation du centre de l'Île-de-France (proche couronne et Paris), ainsi qu'à sa population très nombreuse (près de 11 millions d'habitants). La faible importance des prélèvements agricoles relativement à la moyenne nationale est due en partie au climat de l'Île-de-France, qui permet souvent de se passer de l'irrigation.

Mais la faible importance des prélèvements pour l'irrigation ne doit pas masquer le fait que le territoire de l'Île-de-France a une dominante agricole, puisque plus de la moitié (53,1 %) de l'espace est à usage agricole (cf. tableau 25).

L'Île-de-France doit donc assurer la demande en eau pour des usages divers : centrale électrique, industrie, agriculture, eau potable.

ⁱ cf. définition p. 63

Tableau 26. Répartition de la SAU en Île-de-France en 2000 en Île-de-France

Type de culture	% de la SAU
Céréales	59,5 %
Oléagineux	10,7 %
Légumes secs	8,4 %
Betteraves industrielles	7,6 %
Jachères	6,5 %
Autre terres arables	3,5 %
Surface toujours en herbe	2,9 %
Autre	0,9 %
SAU	100 %

Source : AESN, 2002

Tableau 27. Volume d'eau prélevée pour l'irrigation en 2000 en Île-de-France

Département	Surface agricole irriguée (ha)	Volume (10 ³ .m ³)	% eaux de surface	Consommation (m ³ /ha) ^a
75	0	0	0%	0
77	10 814	9 800	10%	28
78	2 729	2 143	16%	23
91	4 291	3 631	2%	41
92	14	12	0%	367
93	133	104	0%	110
94	179	297	6%	255
95	1 259	1 374	9%	23
Île-de-France	19 419	17 361	9%	27
Moyenne nationale			71%	171

(a) consommation par hectare de Surface Agricole Utilisée **totale**

Source : RNDE, 2001

L'agriculture

L'Île-de-France est une région avec une forte présence agricole. En effet, la SAU (surface agricole utile) couvre 583 246 ha, soit 48,3 % du territoire (RGAⁱ, 2000). La Seine-et-Marne est le département le plus agricole, il comprend 50 % des exploitations franciliennes et 29 % de la SAU totale. L'agriculture francilienne se caractérise par une grande proportion de cultures céréalières, une faible importance des herbages et une quasi-absence d'élevage. 63 500 ha sont irrigables, soit un peu plus de 10 % de la SAU, mais seulement 19 419 ha sont effectivement irrigués (AESN, 2002).

Le volume total prélevé en 1999 était de 17,7 Mm³ (AESN, 2002). Cependant, ce chiffre est certainement sous-estimé car d'une part tous les prélèvements ne sont pas déclarés (seulement 43 % des volumes prélevés en surface et 70 % des volumes en souterrain, moyenne nationale), et d'autre part, la moitié des volumes sont calculés (par l'Agence de l'eau) à partir d'un système forfaitaire. La mise en place de compteurs sur tous les points de captage est en développementⁱⁱ.

Les prélèvements agricoles se font à 94 % dans les nappes, soit 16,9 Mm³. Les plus importants ont lieu en Seine-et-Marne et en Essonne, au niveau de la nappe de la Beauce. Cette situation s'oppose à la moyenne nationale, où 71 % de l'eau utilisée en agriculture provient de masses d'eau superficielles (RNDE, 2001).

Le mode d'irrigation le plus courant en Île-de-France est l'irrigation par aspersion, qui a une efficacité de 100 %ⁱⁱⁱ, ce qui signifie que toute l'eau prélevée se retrouve dans les cultures. Les volumes de prélèvements et de consommation sont donc quasi-égaux.

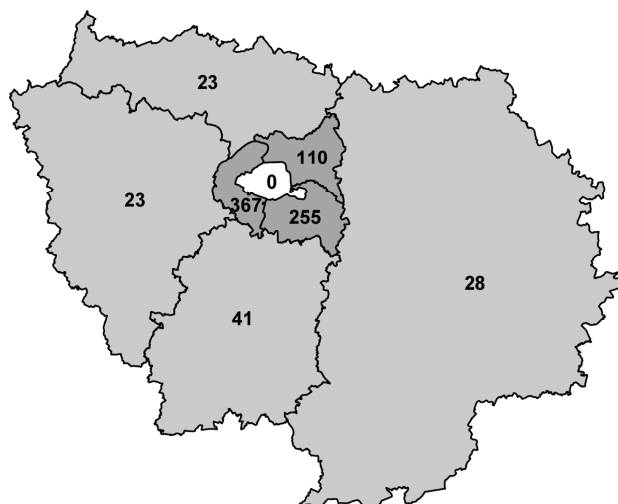
Comme le montrent les deux figures 10 et 11, il y a deux types bien distincts d'agriculture en Île-de-France.

ⁱ RGA : recensement général agricole

ⁱⁱ Depuis 1997, les compteurs sont obligatoires pour toutes les activités de prélèvements. Sur le terrain, ce n'est pas toujours appliqué. Les secteurs les plus équipés sont dans l'ordre la production d'eau potable, l'industrie et enfin l'agriculture.

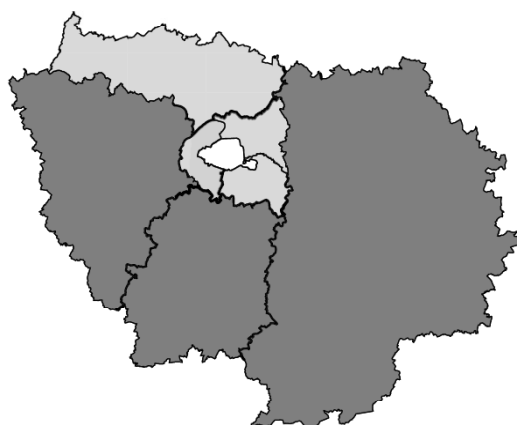
ⁱⁱⁱ Alors qu'elle n'est que de 18 % pour l'irrigation gravitaire, beaucoup plus pratiquée dans le sud de la France par exemple.

Figure 10. Volume prélevé pour l'irrigation par unité de SAU en 2001



Source : RNDE, 2001

Figure 11. Volume prélevé par département pour l'irrigation des cultures en 2001



Légende (prélèvement en m³)
gris foncé : 2 à 50 millions
gris clair : inférieur à 2 millions

Source : RNDE, 2001

A la périphérie, on trouve une agriculture de grandes cultures, principalement céréalières, qui prélève la majeure partie de l'eau d'irrigation en Île-de-France (cf. figure 11). Et au centre, dans la proche couronne, l'agriculture pratiquée est très demandeuse en eau : il s'agit essentiellement de maraîchage et d'horticulture. Elle consomme « au total » moins d'eau que les cultures de la grande couronne, mais la pression est plus importante si on considère les prélèvements par unité de surface (cf. figure 10).

Évolution

Il est difficile d'évaluer exactement la quantité d'eau prélevée pour l'agriculture, car malgré l'obligation légale, tous les prélèvements ne sont pas encore comptabilisés. Avant 1992, le nombre de parcelles irriguées était en augmentation, pour des raisons agronomiques et également parce que la PACⁱ subventionnait les cultures irriguées. La réforme de la PAC de 1992 a entraîné la stabilisation des prélèvements (RNDE, 2001).

Conclusion

L'agriculture est le secteur qui prélève et consomme le moins d'eau en Île-de-Franceⁱⁱ. On peut donc s'interroger sur l'efficacité d'un projet de REUE agricole. Cependant, les besoins pour l'irrigation sont maximums au moment où les ressources du milieu naturel sont minimums, donc la REUE peut être un bon moyen de substitution. Il existe aussi une ceinture maraîchère autour de Paris, dont la demande en eau est forte. Ainsi, Faby (1997) explique : « dans le voisinage des villes, la demande viendra généralement d'abord des maraîchers. Ensuite viendront les vergers voire les cultures céréalières. » Une REUE agricole peut donc tout à fait s'envisager.

ⁱ Politique agricole commune, traité qui régle la politique agricole européenne

ⁱⁱ si on regroupe la consommation industrielle et énergétique dans le même secteur

Tableau 28. Volume d'eau prélevée dans les eaux superficielles pour les centrales électriques franciliennes en 2000

Département	Volume (10 ³ .m3)
75	0
77	112 703
78	70 328
91	0
92	0
93	0
94	88 510
95	118 213
-----	-----
Île-de-France	389 754

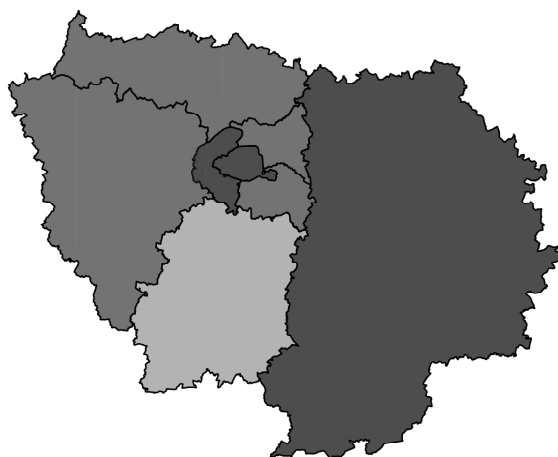
(Source RNDE, 2001)

Tableau 29. Volume d'eau prélevée pour l'industrie (hors énergie) en 2000 en Île-de-France

Département	Volume (10 ³ .m3)	% provenant des eaux de surface
75	90 085	97%
77	26 621	30%
78	13 103	65%
91	6 440	20%
92	55 724	98%
93	9 220	55%
94	21 189	77%
95	11 130	81%
-----	-----	-----
Île-de-France	233 512	81%
-----	-----	-----
Moyenne nationale		59%

(Source : RNDE, 2001)

Figure 12. Volume prélevé et origine souterraine ou superficielle de l'eau, par département, pour l'industrie en 2000



Légende (prélèvements en m³) :
 gris foncé : 25 à 200 millions
 gris : 8 à 25 millions
 gris clair : moins de 8 millions
 (Source : RNDE, 2001)

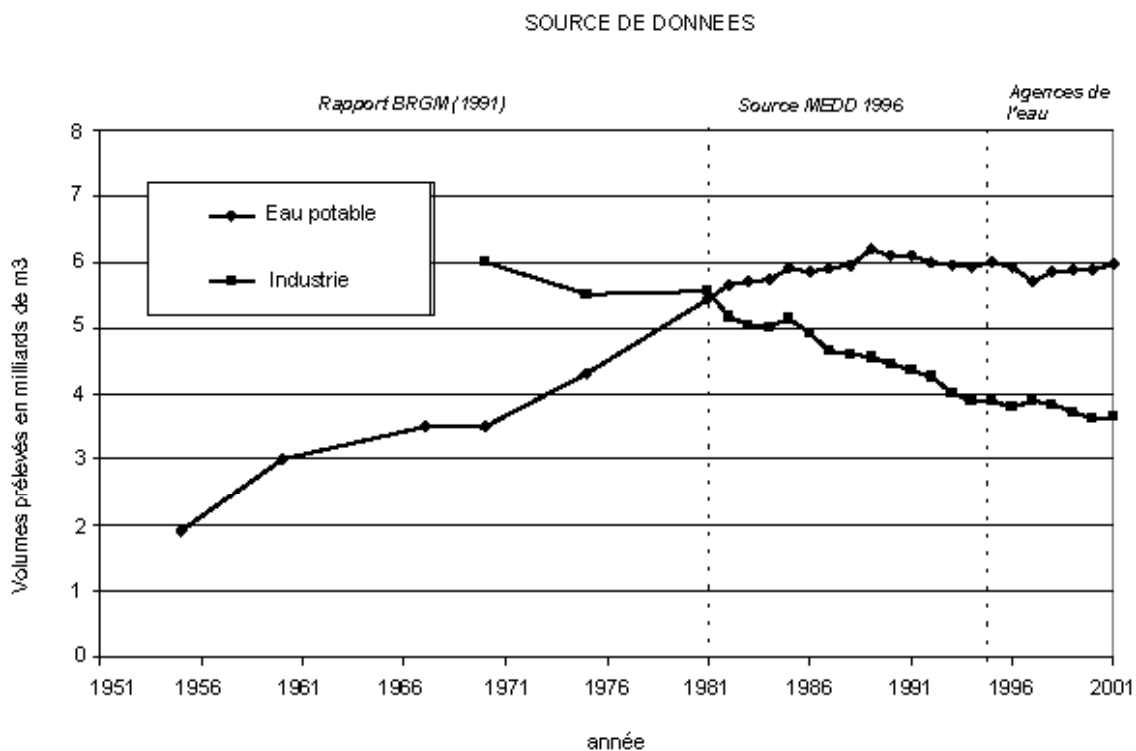
L'industrie et l'énergie

Les prélèvements sont de l'ordre de 600 millions de m³ par an et 65 % de cette eau est prélevée par des centrales électriques (RNDE, 2001). Celles-ci prélèvent de l'eau pour leur circuit de refroidissement essentiellement, et la rejettent dans le milieu naturel, sans modifier sa composition chimique (elle est juste légèrement réchauffée). Ceci ne modifie *a priori* pas le volume de la masse d'eau, sauf si les rejets ont lieu loin du point de prélèvement, sur un autre bassin versant par exemple. Le niveau de consommation est faible, même si avec l'apparition des circuits de refroidissement fermés, il est passé de 0,6 % à 6 ou 7 %. Les prélèvements se font uniquement dans des eaux de surface, sauf pour 137.10³ m³ dans le Val d'Oise (95), qui se font dans une nappe phréatique.

De nombreuses industries se concentrent dans la région parisienne car elles bénéficient de transports de qualité dans un maillage dense et de la proximité des marchés finaux (consommateurs et population urbaine). Il y a environ 2 000 sites industriels en Île-de-France. Les secteurs industriels les plus gourmands en eau sont par ordre croissant : les industries du lait, la sidérurgie/fonderie/métallurgie, la fabrication du sucre, les activités chimiques « de base » et la fabrication du papier/carton. On retrouve toutes ces activités en Île-de-France avec par exemple en proche couronne trois sites agroalimentaires, six sites chimiques, trois sites de métallurgie et traitement de surface et une papeterie (AESN, 2003). Le coefficient de consommation est estimé à 7 % (RNDE, 2001) pour les industries. On peut donc calculer le volume consommé par les industries en Île-de-France : 16 345 000 m³ pour l'année 2001.

On remarque que **les prélèvements se font principalement dans les eaux superficielles** sauf pour deux départements : la Seine-et-Marne et l'Essonne (cf. figure 12). Dans le cas des nappes souterraines, l'eau prélevée n'est pas restituée à la nappe, mais dans les rivières. Donc même si les prélèvements sont faibles, **la pression industrielle est réelle car les nappes s'épuisent**. En Île-de-France, cette pression équivaut à celle de 800 000 habitants (AESN, 2002).

Figure 13. Évolution des prélèvements domestiques et industriels (hors centrales) de 1995 à 2001 en France



Source : RNDE, 2001

Évolution

Les prélèvements des industries, hors production d'énergie électrique, sont constamment à la baisse. En moyenne nationale, la consommation industrielle a diminué de 37 % depuis 1970, ce qui est lié au développement de nouveaux process industriels et à l'optimisation des coûts au sein des entreprises. Les prélèvements pour l'énergie ont augmenté régulièrement à partir des années 60, surtout pendant le choc pétrolier de 1974 et le développement du nucléaire. Ils se sont stabilisés depuis les années 1990.

Conclusion

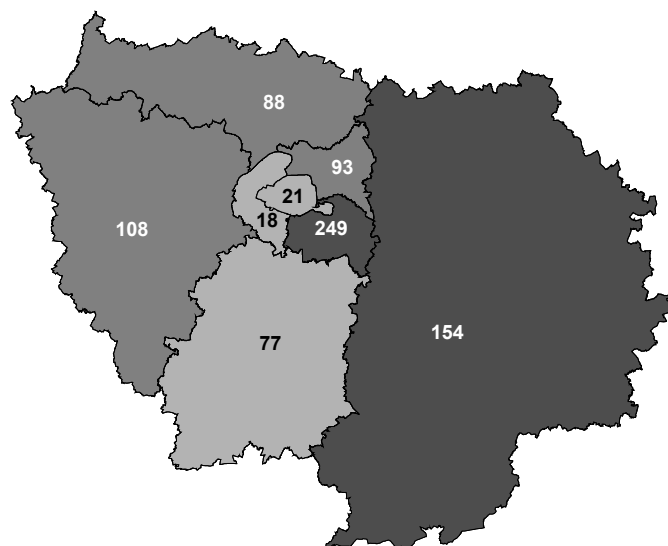
L'utilisation de l'eau pour l'énergie représente la plus grande part des prélèvements et de la consommation d'eau en Île-de-France, après l'eau potable. La pression qu'exerce l'industrie en général sur les masses d'eau souterraines et superficielles pourrait justifier les projets de REUE.

Tableau 30. Volume d'eau prélevée pour la production d'eau potable en 2000 en Île-de-France

Département	Population	Volume (10 ³ .m ³)	% eaux de surface	Consommation (m ³ /hab)
75	2 125 246	44 632	99,9%	21
77	1 193 767	184 585	25%	154
78	1 354 304	146 525	15%	108
91	1 134 238	87 722	80%	77
92	1 428 881	26 023	60%	18
93	1 382 861	129 117	93,5%	93
94	1 227 250	305 953	97%	249
95	1 105 464	97 560	75%	88
Île-de-France	10 952 011	1 022 117	67%	93
Moyenne nationale			38%	100

Source : RNDE, 2001

Figure 14. Volumes moyens en eau potable prélevée par habitant en 2001 (m³/hab)



Source : RNDE, 2001

L'eau potable

En 1999, un milliard de m³ ont été prélevés dans les nappes, les sources et les rivières d'Île-de-France pour satisfaire aux besoins en eau potable. Les eaux sont issues pour 2/3 des réserves de surface et pour le 1/3 restant des réserves souterraines. Le taux de fuite dans les réseaux de distribution est estimé à 14,5 % (AESN, 2002), soit une consommation de 805 millions de m³. La consommation par habitant est de 78 m³/j, ce qui correspond à la moyenne nationale. Les usages pour l'eau potable sont répartis comme suit (AESN, 2002) :

- Usage domestique (consommation des ménages) : 80 %
- Usage des bureaux (consommation humaine courante et climatisation) : 4,1 % ;
- Usage des commerces : 3,9 % ;
- Usage des établissements d'enseignement scolaires et supérieurs : 2,7 % ;
- Usage du secteur hôtelier : 1,3 % ;
- Usage de la restauration : 1,02 % ;
- Usage des hôpitaux : 1 % ;
- Usage des équipements communaux (espaces verts, vestiaires, piscines) : 0,57 % ;
- Part non expliquée (industries desservies par réseaux publics notamment) : 4,5 %.

Il y a une forte disparité de consommation, de volume prélevé et d'origine des eaux prélevées entre les départements, comme le montre le tableau 31. Dans le Val-de-Marne et en Seine-et-Marne, les prélèvements sont importants car ces départements alimentent Paris. Les usines de traitement d'eau potable fonctionnent en général à moitié de leur capacité nominale, afin de fournir une alimentation de secours si l'une d'elle était contrainte de s'arrêter. La pression des prélèvements est particulièrement forte en période d'étiageⁱ : ainsi, les 5 usines de production d'eau potable de la Marne ont prélevé 350.10⁶ m³ en 1999, soit une moyenne de 11,2 m³/s **ce qui correspond à 1/3 du débit d'étiageⁱⁱ de la Marne**. Leurs capacités nominales représentent 47 % du débit d'étiage (AESN, 2002). D'autre part, il arrive souvent que les prélèvements ne soient pas rejetés dans le même bassin versant que celui où ils ont eu lieu. Par exemple, on estime que seulement 15,4 % du volume prélevé dans la Marne sont restitués au bassin de la

ⁱ débit d'étiage : débit le plus faible d'un cours d'eau sur une période donnée

ⁱⁱ QMNA5 (débit mensuel minimal annuel sur 5 ans) = 32 m³/s pour la Marne

Marne. Une part importante est distribuée ailleurs en Île-de-France et les rejets se font principalement aux grandes stations de traitements situées à Valenton, Colombes ou Achères.

L'eau potable en proche couronne

Le SEDIF (Syndicat des eaux d'Île-de-France) gère la production et la distribution d'eau potable dans 144 des communes de l'Île-de-France, dont la majorité des communes de la proche couronne. 98 % de ses ressources proviennent de la Marne, de la Seine et de l'Oise. Il y a 3 usines de production d'eau potable :

- à Choisy-le-roi : cette usine a une production maximale de 800 000 m³/j, avec une moyenne de 350 000 m³/j. Elle fournit de l'eau potable à 1,7 millions d'habitants. Les techniques de potabilisation sont le filtre à sable, l'ozonation et la chloration ;
- à Méry-sur-Oise : cette usine a une production maximale de 340 000 m³/j, avec une moyenne de 170 000 m³/j. Elle fournit de l'eau potable à 800 000 habitants. Les techniques de potabilisation sont soit une filière biologique classique, soit une filière utilisant la nanofiltration et les ultraviolets ;
- A Neuilly-sur-Marne : cette usine a une production maximale de 800 000 m³/j, avec une moyenne de 300 000 m³/j. Elle fournit de l'eau potable à 1,6 millions d'habitants. Les techniques de potabilisation sont le filtre à sable, le charbon actif, l'ozonation et la chloration (site Internet SEDIF).

En comptabilisant les volumes prélevés par le SEDIF et ceux prélevés par les communes qui dépendent d'autres syndicats, le volume total prélevé en 2000 en proche couronne a été d'environ 450 millions de m³. Au total, la proche couronne est alimentée à 70 % en eaux de surface. Les 30 % d'eaux souterraines proviennent :

- des grands champs captants situés en aval de Paris. **Ceux-ci sont d'ailleurs rechargés par de l'eau de Seine préalablement traitée, procédé que l'on retrouve dans le cas de la REUE (AESN, 2002) ;**
- d'aqueducs qui amènent de l'eau souterraine provenant d'autres régions que l'Île-de-France (Eure-et-Loir, Aisne, Yonne) ;
- et d'autres aqueducs qui partent de la Seine-et-Marne et qui rejoignent les précédents.

L'eau potable en grande couronne

Pour la grande couronne, une multitude de syndicats et de gestionnaires s'occupent de la distribution et de la gestion de l'eau potable. Cette zone regroupe environ 2,6 millions d'habitants, dans un habitat dispersé, plutôt en zone rurale. Les prélèvements se font essentiellement dans des eaux souterraines, (129 Mm³ en 1999) et peu dans les eaux de surface (11,8 Mm³). L'Agence de l'Eau souligne **la dégradation des eaux souterraines dans cette région, et regrette qu'il y ait peu de traitements préventifs pour l'instant** (AESN, 2002). Par conséquent, les traitements des eaux souterraines avant distribution deviennent de plus en plus intensifs. La situation est d'autant plus préoccupante que l'inertie des nappes rend la restauration de leur qualité longue. A ce sujet, la réutilisation des eaux usées épurées, qui permet de protéger le milieu en diminuant les rejets des stations d'épuration, peut être envisagée comme une des solutions préventives possibles.

L'eau potable à Paris

Paris compte 2 100 000 habitants et plus de 2 000 000 de personnes y travaillent chaque jour. Pour assurer cette demande, près de 680 000 m³ d'eau sont distribués chaque jour (site Internet SAGEPⁱ). L'eau vient à 50 % des eaux de surface et à 50 % des eaux souterraines. Trois usines traitent l'eau de la Seine (Ivry et Orly) et de la Marne (Joinville). Des sources sont captées au niveau de huit usines en-dehors de Paris, parfois lointaines de 150 kilomètres, et acheminées par des aqueducs ; ils totalisent une longueur de 600 km. L'eau est ensuite stockée dans cinq grands réservoirs, qui ont une capacité totale équivalente à deux jours de consommation (1,4 million de m³). Le réseau de distribution est très dense et interconnecté. Il mesure 1776 km.

La SAGEP gère la production et l'acheminement de l'eau jusqu'à Paris (*via* les aqueducs) ; elle délègue la distribution de l'eau dans Paris à deux sociétés : « Eaux et Force – Parisienne des Eaux » pour la rive gauche, et la « Compagnie des Eaux de Paris » pour la rive droite. La SAGEP, les sociétés distributrices, la DDASS et le CRECEP (Centre de recherche et de contrôle des eaux de Paris) effectuent des contrôles réguliers de la qualité de l'eau potable.

ⁱ SAGEP : Société anonyme des eaux de Paris

Les usages urbains

Les pompiers de Paris s'alimentent sur le réseau d'eau potable de la ville. Ils ne peuvent pas donner d'estimation précise de leur consommation annuelle car elle est extrêmement variable et dépend de la force des incendies rencontrés. Dans le reste de l'Île-de-France, l'alimentation des pompiers en eau est très diverse et dépend du contexte local (eau potable, eau de rivière, citerne d'eau de pluie, etc. mais aucun cas de REU). En Seine-et-Marne, plus de 300 collectivités font appel au réseau d'eau potable pour la lutte anti-incendie (FNDAE, 2000). Paris dispose également d'un réseau de distribution d'eau non potable où coule de l'eau de Seine (cf. encadré III^e partie). L'estimation des prélèvements est difficile à faire. La Direction de l'environnement de la mairie de Paris estime qu'elle consomme environ 25 550 000 m³ par an pour nettoyer les chaussées de la ville. La Direction des parcs et jardins et des espaces verts est en train d'estimer sa propre consommation ; il apparaît déjà que les volumes utilisés pour l'arrosage sont négligeables par rapport au remplissage des bassins des bois de Boulogne et Vincennes (cf. encadré p. 86).

Évolution

La consommation en eau potable a augmenté des années soixante aux années quatre-vingt-dix, avec l'augmentation du niveau de vie (cf. figure 13). Puis elle s'est stabilisée. On constate aujourd'hui à l'échelle du bassin Seine-Normandie une relative stabilité des prélèvements destinés à l'eau potable avec une tendance plutôt à la baisse. Les besoins supplémentaires générés par l'augmentation de population et l'amélioration du confort des ménages sont compensés par les nouvelles technologies des appareils ménagers et industriels consommateurs d'eau, le comportement des usagers face au prix de l'eau et la recherche du meilleur rendement des réseaux de distribution d'eau potable.

Conclusion

La production d'eau potable est le premier utilisateur de l'eau en Île-de-France, tant au niveau des prélèvements que de la consommation. Il paraît donc intéressant d'essayer de pourvoir à cette demande par un projet de REUE. De plus, beaucoup de besoins urbains sont satisfaits avec de l'eau potable alors que les contraintes sanitaires ne l'exigent pas forcément : eau d'extinction des incendies, arrosage des espaces publics, etc. Substituer de l'eau épurée à cette eau potable peut donc se révéler justifié d'un point de vue économique.

Conclusion générale sur les ressources et les besoins en Île-de-France

L'Île-de-France prélève chaque année environ 1,5 milliard de m³ d'eau, et les précipitations en apportent environ 8 milliards. Ce constat est *a priori* rassurant. Cependant, les précipitations sont réparties irrégulièrement dans l'espace et le temps, donc il existe des pressions localisées parfois très importantes sur les masses d'eau, comme par exemple les prélèvements dans la Marne qui représentent 1/3 de son volume d'étiage. D'autre part, il existe aujourd'hui peu de réserves d'eau non exploitées en Île-de-France : les principales rivières sont toutes utilisées pour différents usages (usines de production d'eau potable, prélèvements agricoles, industriels, etc.) et des eaux souterraines, seule la masse d'eau de La Bassée est peu exploitée : elle constitue l'ultime réserve. Il faudra d'ailleurs comparer le prix d'une REUE à l'exploitation de cette nouvelle ressource si ces deux projets entrent en compétition.

A ces pressions quantitatives s'ajoutent des pressions qualitatives liées aux activités humaines. L'état qualitatif des masses d'eau d'Île-de-France est présenté dans la prochaine partie, ainsi que les caractéristiques de ses services d'assainissement.

Tableau 31. Surface imperméabilisée et flux ruisselé en Île-de-France

	Superficie (km ²)	% surface imperméabilisée	Surface imperméabilisée (km ²)	Flux ruisselé Mm ³ /an
Paris	105	60-70	68	40,8
Proche couronne	657	37	243	145,8
Grande couronne	11250	5	586	315,6
Île-de-France	12012	7	897	538,2

(source : données Corine Land Cover *in* AESN, 2002)

Les différentes pressions sur la qualité des masses d'eau en Île-de-France

Origine de la pollution : rejet et ruissellement

Les masses d'eau sont polluées par deux voies : les rejets issus d'une activité humaine et le ruissellement des eaux de pluie sur des surfaces polluées.

Les rejets en Île-de-France

Les rejets peuvent se faire soit sur le site d'utilisation (et donc de dégradation) de l'eau, soit via le système de collecte des eaux usées : les égouts. Environ 90 % des particuliers sont raccordés aux égouts, les 10 % restants disposant d'un assainissement individuel (fosse septique). La majorité des sites industriels (80 %) sont raccordés au réseau d'assainissement collectif ; en proche couronne, ce taux atteint les 100 %. Les entreprises qui ne sont pas raccordées traitent leurs eaux usées sur place avant de les rejeter dans le milieu naturel, ou éventuellement de les recycler. Les rejets ne sont autorisés que dans les eaux de surfaceⁱ.

Même si le traitement des stations d'épuration permet de réduire considérablement la charge en polluant, leurs rejets dans le milieu ont un impact important sur la qualité des cours d'eau. Quand les industries sont raccordées au réseau d'assainissement collectif, il faut faire la part des apports domestiques et industriels. Selon les stations, la proportion des rejets industriels peut atteindre une valeur de plus de 50 % sur l'année (AESN, 2003).

Le ruissellement en Île-de-France

Sur les 12 000 km² de l'Île-de-France, 7 % (soit 897 km²) sont des surfaces imperméabilisées. Les eaux de pluie qui ruissellent sur ces surfaces sont collectées par les réseaux unitaires ou

ⁱ A notre connaissance, il n'y a qu'une exception en Île-de-France : d'après le site Internet de la DRIRE, la société la Grande Paroisse à Grandpuits-Bailly (77) est autorisée, en dérogation de l'arrêté ministériel du 10 juillet 1990, à rejeter ses effluents dans une nappe profonde (nappe du Dogger, - 2000 m).

séparatifs. Cependant, l'AESNⁱ estime qu'environ 20 % du ruissellement « échappe » aux collecteurs. En milieu rural, les eaux pluviales provoquent en outre le lessivage des terres agricoles, entraînant engrais et pesticides vers les cours d'eau ou les nappes. Les décharges de déchets domestiques ou industriels, lorsqu'elles ne sont pas aménagées, sont également lessivées par les eaux de pluie.

Les eaux de ruissellement vont exercer une pollution partielle sur le milieu naturel soit directement, soit par le biais des rejets des stations d'épuration. A Paris, on peut considérer que toute l'eau ruisselée est collectée (AESN, 2002) ; elle est alors rejetée en Seine directement par des déversoirs d'orage, ou par le biais des stations d'épuration du SIAAP. En Île-de-France, l'Agence de l'Eau souligne le besoin d'une synthèse des données locales pour mieux appréhender l'impact réel des eaux de pluie sur l'environnement en général et la filière assainissement en particulier.

ⁱ Agence de l'eau Seine-Normandie

La pollution organique

Les rejets de matière organique proviennent des rejets domestiques et des industries agroalimentaires. Les autres industries polluent avec de la pollution organique dite « dure », c'est-à-dire des produits difficilement biodégradables. Les zones hydrographiques où s'exerce une pression importante sont :

- soit des zones hydrographiques à faibles débits, en têtes de bassins versants qui sont sensibles même aux faibles apports polluants ;
- soit des zones urbaines et industrielles qui impactent fortement sur les masses d'eau. Ainsi, les 4 grandes stations d'épuration de la proche couronne ont des rejets importants.

Les trois grandes rivières d'Île-de-France (la Seine, la Marne et l'Oise) sont de mauvaise qualité pour la matière organique (AESN, 2003). Cependant, avec l'amélioration du parc des stations d'épuration, la qualité générale du milieu est en amélioration.

Les matières en suspension

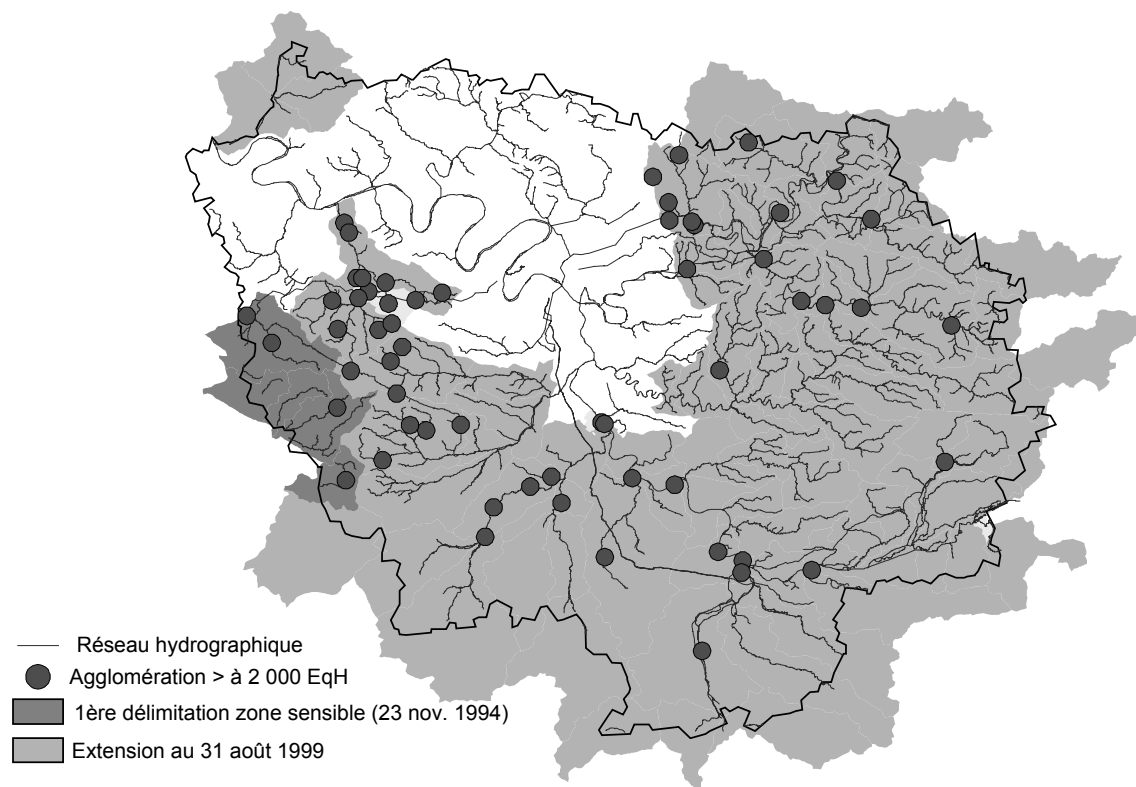
Les problèmes de MES sont liés à l'érosion des sols en milieu agricole intensif, ou dans des zones fortement urbanisées. La Marne, quelques kilomètres avant sa confluence avec la Seine, a une qualité « médiocre » pour les MES.

La présence de MES dans les eaux souterraines présente un risque pour la production d'eau potable, car elles sont porteuses de micro-organismes. Cependant, l'Île-de-France est peu touchée par ce problème de pollution aux MES.

L'azote et les nitrates

L'agriculture est responsable de la plus grande partie des pollutions aux nitrates en Île-de-France. Les plus mauvaises qualités sont rencontrées dans le sud de la Région. La qualité générale est moyenne à médiocre. Il s'agit d'une pollution diffuse difficile à contrôler et à

Figure 15. Les agglomérations de plus de 2000 EH situées en zone sensible



(Source : DIREN, 2000)

maîtriser, rendant impossible toute idée de traitement avant rejet dans le milieu. Le meilleur moyen de réduire la pollution azotée est donc d'optimiser les quantités utilisées en agriculture.

Les rejets urbains sont la deuxième source de la pollution azotée, principalement sous forme d'urée. Selon la directive cadre européenne, la réglementation doit distinguer des zones sensibles, c'est-à-dire des zones particulièrement vulnérables à la pollution aux nitrates et aux phosphates. Les communes situées en zone sensible doivent se doter d'un système d'assainissement qui permet de traiter les nitrates et/ou les phosphates issus des rejets urbains à un niveau conforme à la réglementation. La figure 15 présente les communes d'Île-de-France de plus de 2000 EH situées en zone sensible.

Pour ce qui est des eaux souterraines, sur le bassin Seine-Normandie, 33 % des captages d'eau potable présentent des teneurs en nitrate de 20 à 40 mg/l (qualité moyenne) et 14 % une teneur supérieure à 50 mg/l (qualité médiocre). Depuis 1998, on observe une dégradation de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis des nitrates. En Seine-et-Marne, sur la période 1993-2001, plus de 20 captages ont été abandonnés à cause d'un dépassement de la norme du taux de nitrates (50 mg/l) (AESN, 2003).

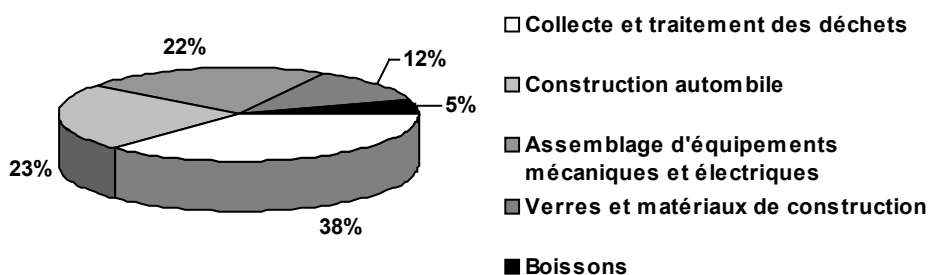
Le phosphore

Il provient des rejets domestiques (lessive), industriels et de l'érosion des sols. Il convient donc de limiter au maximum l'érosion des sols agricoles.

Le traitement du phosphore en station est insuffisant, avec un taux d'élimination pour le bassin Seine-Normandie de 41 % (AESN, 2003). Les tonnages déversés sans traitement résultent en grande partie de l'entraînement des eaux domestiques par les eaux pluviales lors des débordements des réseaux par temps de pluie. Les rivières les plus touchées sont la Seine et quelques petites rivières d'Île-de-France.

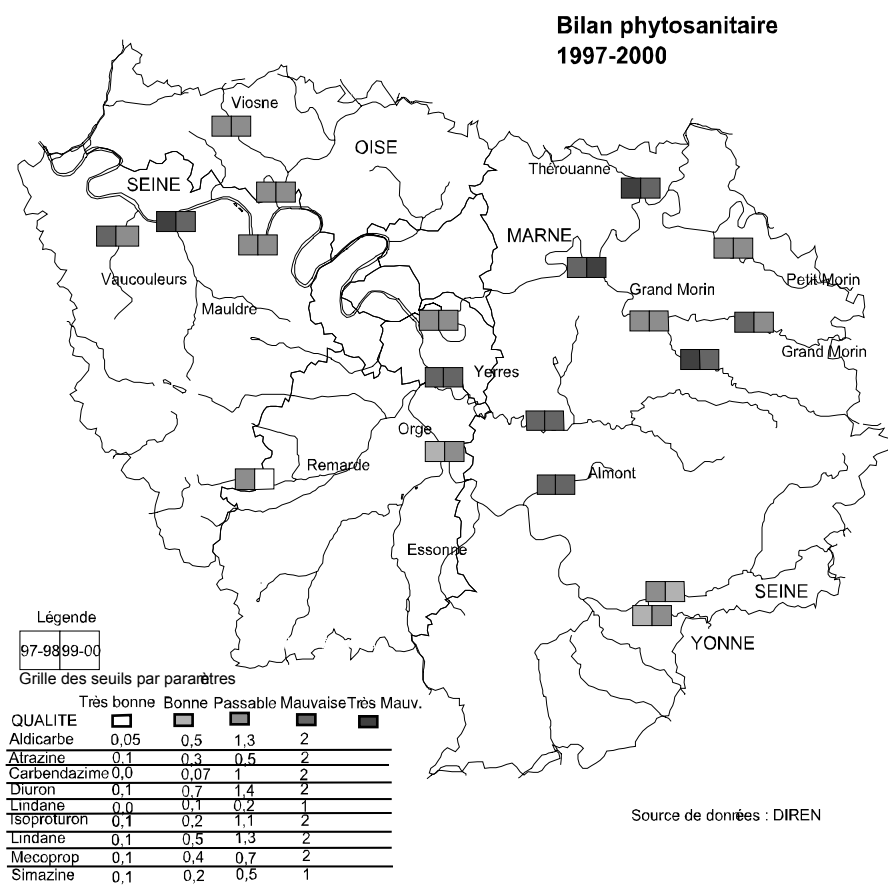
L'amélioration du parc des stations d'épuration, avec en particulier la mise en place d'une unité de déphosphatation à Achères en 2001, a permis de diminuer les rejets en phosphore.

Figure 16. Origine de la pollution en métaux lourds selon le type d'industrie (en %)



Source : AESN, 2003.

Figure 17. L'évolution qualitative des cours d'eau de 1997 à 2000 (Diren, 2000)



Les métaux lourds

En général, l'agriculture apporte principalement deux métaux lourds : le cadmium dans certains engrais, et le zinc dans le lisier de porc. Ce dernier cas concerne peu l'Île-de-France où l'élevage de porcs est quasi-absent.

Les métaux lourds ne sont pas dégradés dans l'environnement, donc réduire la pollution métallique passe par une réduction des émissions. Les rivières d'Île-de-France ont en général une qualité moyenne à médiocre, et la Seine est sensiblement dégradée après Paris. Les métaux les plus impliqués sont le plomb, le mercure et le zinc.

La plupart des aquifères d'Île-de-France ont une qualité bonne à très bonne en ce qui concerne les métaux lourds. Les pollutions éventuelles sont très souvent ponctuelles et ne concernent dans la plupart des cas qu'un seul élément. Sur le bassin Seine-Normandie, seuls 13 % des 400 captages réalisés en 2000 présentent un état médiocre (AESN, 2000).

Les pesticides

L'agriculture est responsable de la plus grande partie des pollutions aux pesticides (90 % des apports de pesticides dans le bassin versant de la Marne sont dus à l'agriculture, selon l'AESN). C'est le ruissellement des eaux de pluie sur les sols qui entraîne les produits phytosanitaires dans le milieu naturel. L'autre voie de contamination est la pollution accidentelle, lors d'opérations de maintenance comme le nettoyage des cuves.

On observe une qualité souvent moyenne, parfois bonne en Île-de-France. Mais ce diagnostic est à relativiser car le nombre d'analyses en rivière et de molécules analysées est faible. Les trois molécules dépassant le plus les normes sont : la carbendazine, l'atrazine (interdite aujourd'hui) et l'isoproturon.

Aucun pesticide n'a été détecté dans l'aquifère de l'Albien captif. Par contre, la masse d'eau de la Beauce présente depuis 3 ans une dégradation importante et très importante de 30 à 35 % des points de captage. La pollution en pesticides d'une nappe peut en outre induire un impact sur la qualité des cours d'eau superficiels, comme c'est le cas pour les aquifères de la craie du Gâtinais et des calcaires de Champigny.

Les autres micropolluants organiques

Les autres micropolluants organiques sont issus des activités industrielles et domestiques, ainsi que du transport. Citons :

- les solvants chlorés, qui sont mesurés depuis 10 ans et qui ne semblent pas poser de problème en Île-de-France ;
- les HAP (Hydrocarbure Aromatique Polycyclique) qui proviennent de la combustion des énergies fossiles (chauffage urbain, circulation automobile, etc.) et qui se répandent *via* l'atmosphère. Ils sont donc uniformément répartis sur la région, et pour ce critère la qualité des rivières est moyenne à médiocre.

Pression sur l'hydromorphologie

Il s'agit des activités humaines qui dégradent la morphologie des cours d'eau, ce qui a un impact sur l'activité biologique. La navigation est la principale de ces activités, notamment à cause des aménagements dont elle a besoin : barrage, écluse, etc.

La production des granulats est la pression industrielle la plus préoccupante pour les **eaux souterraines**. 70 % des granulats d'Île-de-France sont produits à partir de granulats alluvionnaires. L'extraction des granulats détruit la structure du sol et affecte les nappes (AESN, 2002).

Conclusion

Les masses d'eau superficielles sont polluées essentiellement par les matières organiques, les nitrates et le phosphore, ainsi que par les métaux lourds. La qualité des masses d'eau souterraines est relativement meilleure, mais elle se dégrade pour les nitrates et les pesticides.

La période la plus critique est sans doute l'été, car elle réunit les conditions les plus défavorables, à savoir :

- les rivières atteignent leur débit d'étiage, ce qui diminue la quantité d'eau disponible et par effet de concentration, la qualité de cette eau ;
- la demande est à son maximum, aussi bien la demande agricole que les autres demandes : climatisation, circuit de refroidissement, arrosage, etc. ;
- enfin, les rejets augmentent, conséquence de l'augmentation de la consommation en eau, ce qui dégrade d'autant plus la qualité des masses d'eau.

La directive cadre européenne sur l'eau impose aux masses d'eau d'atteindre un « bon état écologique » d'ici 2015. Déjà, les services d'assainissement et les collectivités territoriales s'efforcent de respecter les engagements de la France à ce sujet. Dans ce cadre, la REUE pourrait participer à l'amélioration de la qualité des masses d'eau d'Île-de-France en diminuant les prélèvements des utilisateurs et les rejets des stations d'épuration dans le milieu naturel.

L'état de la filière assainissement en Île-de-France

Deux groupes distincts de stations d'épuration

La région Île-de-France compte près de 11 000 000 d'habitants (RG, 1999) et 2 700 sites industriels qui produisent des eaux usées. 90 % des particuliers et 80 % des sites industriels sont raccordés au réseau d'assainissement collectif. La capacité totale d'épuration de l'Île-de-France, d'environ 11,5 millions d'équivalents-habitants (EH)ⁱ, ne permet de traiter que 80 % de ces effluents. Le reste est soit traité en assainissement individuel, soit épandu. L'épandage des eaux usées brutes représente environ 200 000 EH (Metropolis, 2002).

Le nombre exact des stations d'épuration en Île-de-France est difficile à connaître, mais les différentes sources le situent toujours entre 450 et 500 (IAURIF, AESN, FNDAE). La taille moyenne des stations d'épuration est de 3 900 EH, mais elle est extrêmement variable. On trouve ainsi deux stations supérieures à 1 million d'EH et 270 stations de moins de 2 000 EH (site Internet du CIEPEⁱⁱ). On distingue nettement deux groupes :

- les 4 grandes stations d'épuration du SIAAP (Service interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne) qui couvrent environ 75 % du potentiel d'épuration de la région ;
- les autres stations d'épuration aux dimensions beaucoup plus modestes, disséminées dans les zones agricoles de la grande couronne.

La très grande majorité des stations fonctionnent avec des boues activées. Les autres utilisent la filtration (rare), le lagunage, les disques bactériens, les lits bactériens, les décanteurs digesteurs et les traitements physico-chimiques (IAURIF, 2000). Dans les deux paragraphes suivants sont détaillées les caractéristiques des deux groupes de stations.

ⁱ cf. définition : note (ii) au bas de la page 68

ⁱⁱ Centre d'information environnement pour les entreprises

Les stations du SIAAP

Elles sont au nombre de quatre. Leurs caractéristiques principales sont de dépendre du même organisme de gestion (le SIAAP) et d'être des stations d'épuration de grande taille. Elles traitent les effluents de Paris et de la majorité des communes de la proche couronne, soit environ 6 millions d'habitants. Toutes les données suivantes sont tirées du site Internet du SIAAP.

Station Marne-Aval, Noisy-le-Grand (93)

C'est la plus petite des 4 stations, avec un débit de 45 000 m³/jour et une capacité nominale de 125 000 EH. Elle a été implantée dans les années 70 afin de faire face au développement urbain à l'Est de Paris. Elle correspond à une volonté de cesser de construire des stations de très grande dimension ou d'agrandir des stations déjà existantes. Elle permet de rééquilibrer la filière assainissement qui s'oriente vers des usines à l'échelle d'agglomérations de taille moyenne.

Les effluents sont traités physiquement puis par boues activées. Il y a une dénitrification par traitement bactérien.

Station Seine-Centre, Colombes (92)

C'est la station la plus récente, elle a été mise en service en 1998. Elle a une capacité nominale de 280 000 m³/jour et 800 000 EH. C'est une usine extrêmement moderne située dans un lieu très urbanisé ; la plupart des ouvrages sont enterrés et toute l'usine est entièrement confinée, afin de ne laisser passer aucune odeur.

Après des prétraitements physico-chimiques, les effluents sont filtrés et dénitrifiés au travers de trois biofiltres.

Station Seine-Amont, Valenton (94)

Cette station de 1 200 000 EH est la deuxième en importance du SIAAP. Elle a une capacité nominale de 340 000 m³/jour.

Le traitement est classique : traitement physique et épuration par boues activées ; il y a une dénitrification partielle lors du traitement bactérien.

Tableau 32. Les stations d'épuration d'Île-de-France(hors SIAAP)

Département	Population	Nombre de communes	Nombres de stations d'épuration	de	Nombre de stations de qualité D et E ^a
Seine-et-Marne (77)	1 200 000	514	252		> 237
Yvelines (78)	1 350 000	262	98		> 85
Essonne (91)	1 100 000	196	56		> 28
Val d'Oise (95)	1 100 000	185	42		> 32
Total grande couronne	4 450 000	1157	448		-

(a) *i.e.* "bon niveau", selon la circulaire interministérielle du 4 novembre 1980 relative aux conditions de détermination de la qualité minimale d'un rejet d'effluents urbains (JO du 29 novembre 1980)

Source : FNDEA (2000), Conseils Généraux du 77, 78, 91 et 95

Station Seine-Amont, Achères (78)

La station d'Achères est la plus grosse station d'épuration d'Europe et la deuxième du monde après celle de Chicago. Elle a une capacité nominale de 2 080 000 m³/jour et de 8 000 000 EH. Elle représente à elle seule plus de 65 % de la capacité d'épuration de l'Île-de-France ! Ce site est depuis longtemps consacré à l'épuration : sa construction a débuté en 1940.

Le traitement est classique : traitement physique puis biologique (boues activées). Les effluents subissent une déphosphatation, mais par contre il n'y a pas de dénitrification.

Les autres stations d'Île-de-France

Elles se situent toutes dans les départements de la grande couronne : la Seine-et-Marne, les Yvelines, l'Essonne et le Val d'Oise.

La Seine-et-Marne est le département le plus rural d'Île-de-France. Son habitat est dispersé : ainsi, pour un nombre à peu près équivalent d'habitants, on trouve deux fois plus de communes que dans chacun des 3 autres départements évoqués. Cet habitat dispersé explique le nombre important de stations d'épuration dans le département : en effet, il est difficile de raccorder les communes aux stations du SIAAP, et les eaux usées sont traitées localement. Par contre, en Essonne, dans les Yvelines et dans le Val d'Oise, il arrive souvent que les effluents soient traités par les stations du SIAAP. Par exemple 30 % de la population de l'Essonne est raccordée à des stations locales, et les 70 % restants (soit 770 000 habitants) sont raccordés aux stations d'Achères et de Valenton.

Conclusion

Ces deux groupes de station vont avoir des influences différentes sur les projets de REUE. Les débits importants des stations du SIAAP peuvent présenter l'inconvénient d'exiger des projets de REUE à grande échelle et de demander des études longues et coûteuses. Mais parallèlement, leur taille permettrait de concentrer l'offre et de réaliser des économies d'échelles. Les petites stations sont dans un milieu plutôt rural, ce qui se prête particulièrement à la REUE agricole. Mais une analyse globale n'est ni possible ni utile, et les études au cas par cas sont inévitables.

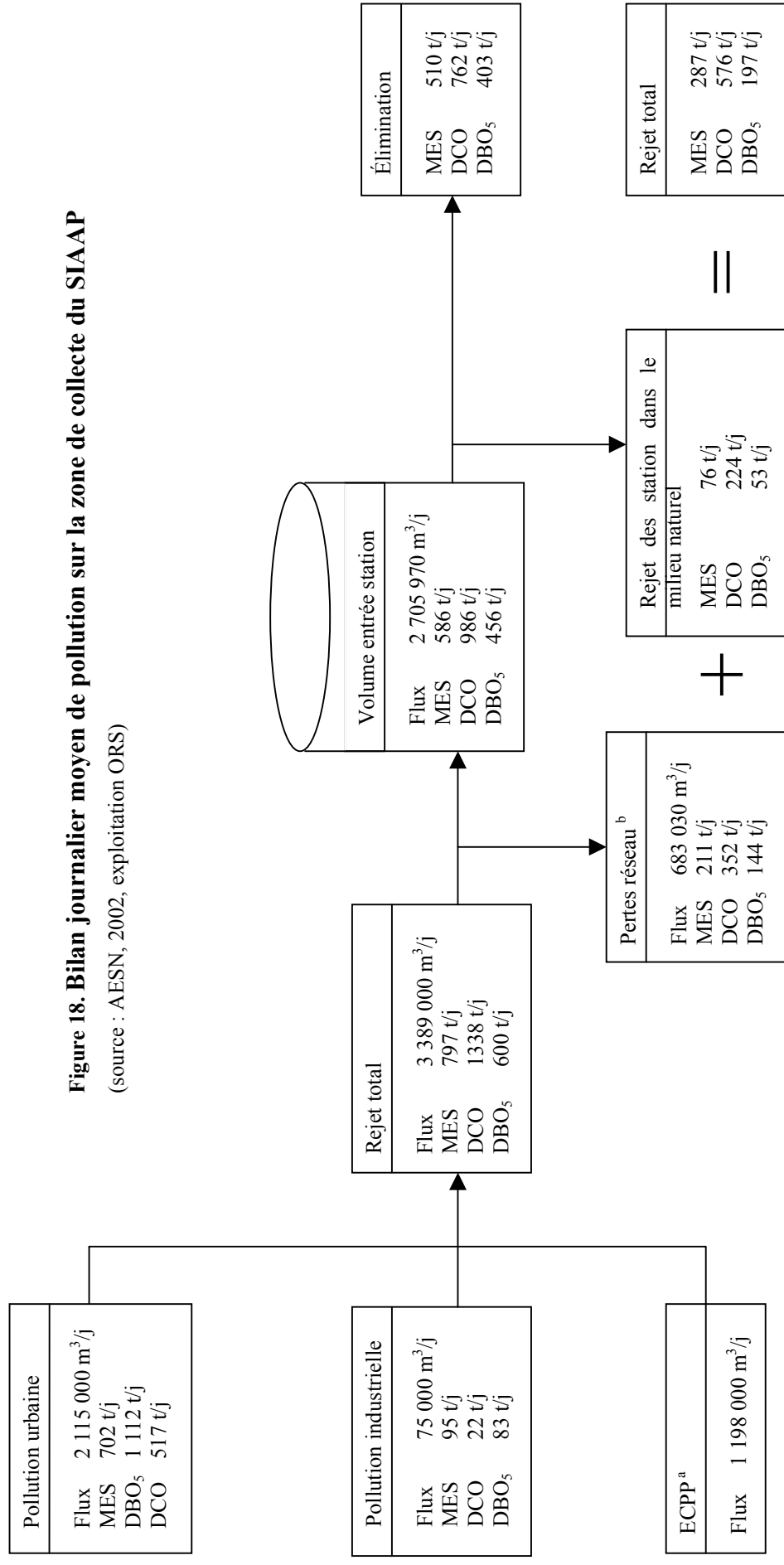


Figure 18. Bilan journalier moyen de pollution sur la zone de collecte du SIAAP

(source : AESN, 2002, exploitation ORS)

(a) **ECPP** : eaux claires permanentes parasites, ponctuelles ou diffuses, sont des eaux peu chargées en pollution, présentes de façon continue dans les réseaux ; elles sont d'origine :
 - naturelle : captage de sources, drainage de nappes, fossés, inondations de réseaux ou de postes de refoulement, ...
 - artificielle : fontaines, drainage de bâtiments, eaux de refroidissement, rejet de pompe à chaleur, de climatisation, chasses d'eau de réseaux, ...

(source : <http://www.siarl.fr/>)

(b) pertes liées aux rejets directs, aux réservoirs d'orage et aux fuites involontaires

La qualité des eaux épurées en Île-de-France

Il est important de connaître l'efficacité des stations d'épuration d'Île-de-France afin, d'une part, d'estimer leur impact sur l'environnement (point de vue « écologique ») et, d'autre part, d'estimer l'ampleur des traitements supplémentaires à mettre en œuvre pour une REUE (point de vue « économique »).

D'après l'AESN, en 1995, seuls 61 % de la pollution brute parvenait aux stations d'épuration d'Île-de-France, à cause des raccordements défectueux et de la fiabilité relative des systèmes d'assainissement. La figure 18 présente le bilan des quatre stations d'épuration du SIAAP, pour qui les pertes durant le transport des effluents s'élèvent à 20 %, soit 80 % des effluents rejetés qui arrivent aux stations. Les abattements moyens sont de 63 % pour les MES, 56 % pour la DCO et 67 % pour la DBO_5 (rapport élimination/rejet total). Pour améliorer ces taux de dépollution, il faut diminuer les rejets. Dans ce but, une REUE peut être tout à fait appropriée.

Malheureusement, les valeurs les plus intéressantes pour la REUE ne sont en général pas référencées par les services d'assainissement. En effet, ces derniers doivent respecter des normes en taux de matière organique, azote et phosphore (cf. deuxième partie - §3) mais pas pour les micro-organismes ou les métaux lourds. Ces derniers paramètres sont donc rarement mesurés. Dans les tableaux 33 et 34 se trouvent les valeurs en métaux lourds et en micro-organismes des eaux usées et épurées de la station Seine-Aval (Achères) du SIAAP. Elles sont issues d'une étude réparties sur les années 2001, 2002 et 2003. Ces résultats sont à analyser avec précaution : ils représentent plus une tendance qu'une réalité. La mise en place d'un suivi régulier de ces paramètres est envisagée par le SIAAP dans les années à venir.

On constate que pour le plomb, la valeur moyenne maximale possible (moyenne au seuil = 0,048 mg/l) est inférieure à la valeur maximale autorisée pour les EDCH (0,050 mg/l). De même pour le mercure où la valeur moyenne maximale possible (moyenne au seuil = 0,104 μ g/l) est inférieure à la valeur maximale autorisée pour les EDCH (1 μ g/l). Ceci ne signifie pas que les eaux épurées respectent toujours les normes EDCH pour les métaux lourds (puisque l'on compare des moyennes), mais préjuge d'une qualité sanitaire correcte qui devrait s'améliorer avec les traitements supplémentaires indispensables à une REUE.

Pour les micro-organismes, l'abattement général est de 1 log environ, et les taux des germes témoins mesurés sont compris, dans les eaux épurées, entre 1.10^5 et 1.10^7 unités/100 ml. La valeur pour les coliformes thermotolérants est de 6.10^5 unités/100 ml, ce qui est supérieur à la

Tableau 33. Les quantités en métaux lourds des eaux épurées des stations du SIAAP

Eau épurée	Cadmium mg/l	Plomb mg/l	Chrome mg/l	Cuivre mg/l	Nickel mg/l	Zinc mg/l	Mercure µg/l
Maximum	0,008	0,000	0,042	0,091	0,026	0,336	0,260
Moyenne au seuil	0,003	0,048	0,008	0,020	0,010	0,079	0,104
Moyenne par défaut	0,000	0,000	0,001	0,021	0,002	0,079	0,010

On note que la mesure des éléments traces métalliques est très souvent en deçà du seuil de quantification analytique. Ceci nous oblige à encadrer les valeurs moyennes par :

- Moyenne au seuil : moyenne des données en considérant le seuil comme étant la valeur
- Moyenne par défaut : moyenne des données en considérant le seuil comme valeur nulle

La valeur moyenne effective étant comprise entre ces deux bornes.

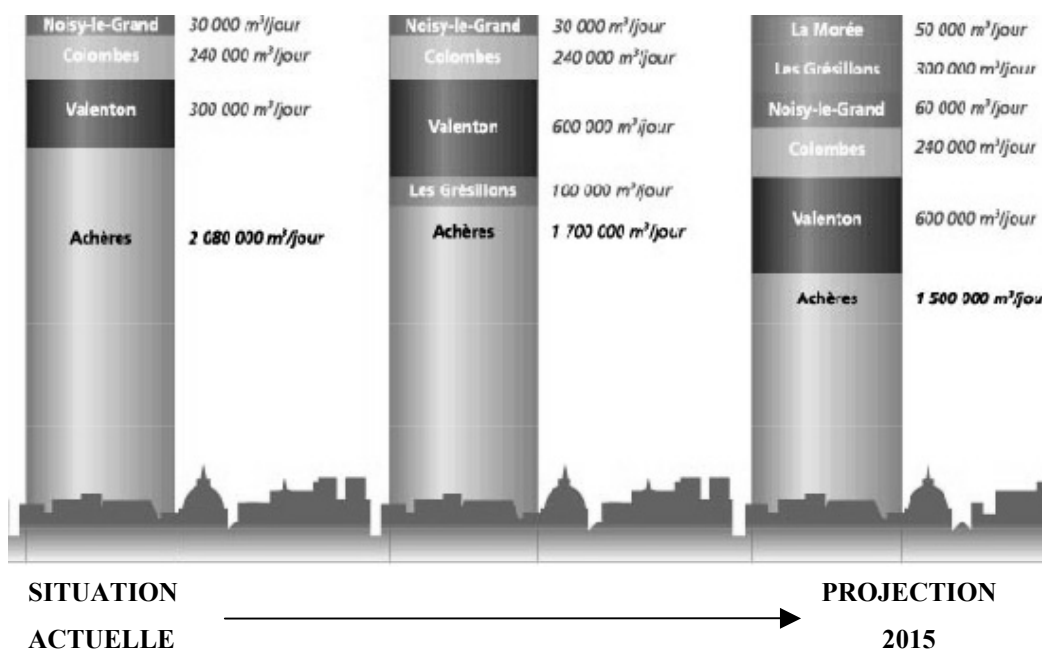
Source : données (2001, 2002, 2003) fournies par le SIAAP

Tableau 34. Les quantités en micro-organismes des eaux épurées des stations du SIAAP

Seine - Aval	µorganismes revivifiables 37°C u/100ml	Coliformes totaux u/100ml	Coliformes Thermotolérants u/100ml	<i>Escherichia coli</i> u/100ml	Entérocoques intestinaux u/100ml
Eau brute	1×10^8	2.5×10^7	7×10^6	5×10^6	1×10^6
Eau épurée	1×10^7	3×10^6	6×10^5	4.5×10^5	1×10^5

Source : données (2001, 2002, 2003) fournies par le SIAAP

Figure 19. Évolution du parc des stations d'épuration du SIAAP jusqu'en 2015



source : site Internet du SIAAP, exploitation ORS

valeur maximale recommandée par le CSHPF : 1 000 unités/100 ml pour la catégorie A. Un traitement supplémentaire de type désinfection est donc inévitable pour un projet de REUE.

L'avenir du parc des stations d'épuration du SIAAP

Pour respecter les prescriptions européennes et la loi sur l'eau de 1992, le taux d'assainissement en France devra atteindre 65 % en 2006. Les stations d'épuration d'Île-de-France doivent donc améliorer leur niveau de traitement. Les stations du SIAAP sont les premières concernées par leur importance dans le réseau d'assainissement de la région. C'est pourquoi le SIAAP s'est lancé dans une politique de réorganisation de ses stations.

Ce projet consiste :

- au doublement de la capacité de Marne-Aval jusqu'à 75 000 m³/jour ; à long terme, interception et traitement des eaux de pluie provenant des réseaux de la rive droite de la Marne ;
- au doublement des capacités de Seine-Amont jusqu'à 600 000 m³/jour d'ici 2005, avec une capacité de pointe de 1 500 000 m³/jour en cas de pluie ; mise en place d'un traitement de déphosphatation/nitrification ;
- à la construction de deux nouvelles stations d'épuration d'ici à 2015, une aux Grésillons (Yvelines) de 300 000 m³/jour et l'autre à La Morée (Seine-Saint-Denis), de 50 000 m³/jour ;
- à la diminution du débit de Seine-Aval (Achères) de 2 000 000 m³/jour à 1 600 000 m³/jour et mise en place d'un traitement de l'azote ;
- à l'augmentation des capacités de stockage, avec notamment la construction d'un tunnel de stockage des eaux de pluie « Ivry-Masséna-Austerlitz » d'une capacité de 80 000 m³ ;
- à la diminution des nuisances sonores et olfactives autour des stations ;
- à l'amélioration du contrôle et de la gestion des flux.

Cette réhabilitation peut à la fois entrer en concurrence avec la REUE (considérant que les efforts faits sont suffisants) ou alors la servir (car une meilleure qualité d'épuration facilite la REUE). Cependant, le coût des traitements exigés est de plus en plus élevé, « si bien que l'alternative qui consiste à ne pas rejeter les eaux usées, mais à les réutiliser peut devenir financièrement intéressant, y compris dans les contextes où il n'y a pas de pénuries d'eau » (Faby, 1997).

Scénarios envisagés

Utilisation agricole

La REUE pour l'agriculture semble être la plus envisageable en Île-de-France. En effet, tous les projets français de REUE sont des projets agricoles et ils sont relativement nombreux. Tout projet similaire en Île-de-France pourra donc largement profiter des expériences acquises. De plus il existe une réglementation des projets de REUE agricole par l'intermédiaire des recommandations du CSHPF. Les contraintes en terme de qualité physico-chimique et microbiologique sont donc connues et il y a peu de chance de se voir opposer un refus par les autorités sanitaires. Cependant, les besoins en irrigation sont en général satisfaits, et l'Île-de-France souffre peu de la sécheresse. La région profite de précipitations abondantes. Donc l'utilité d'un tel projet risque de ne pas paraître manifeste aux yeux des agriculteurs et des collectivités territoriales.

On peut imaginer deux types de scénarios :

- l'irrigation de cultures maraîchères en périphérie de l'agglomération parisienne ;
- l'irrigation à partir de stations situées dans l'espace rural francilien. Les expériences similaires sont nombreuses en France. Les scénarios sont à étudier au cas par cas : il existe peut-être en Île-de-France des contextes locaux particuliers qui inciteraient à ce type de REUE.

Utilisation pour l'industrie et la production d'énergie

Au contraire de la REUE agricole, la REUE à usage industriel souffre, à notre connaissance, d'une absence d'expérience en France. Les projets trouvés à l'étranger pourront cependant servir d'exemples. Par ailleurs, il n'existe aucune réglementation nationale. Tout projet en ce sens sera donc un projet pionnier et par là plus difficile à mettre en œuvre. Les contraintes physiques, chimiques et sanitaires seront à déterminer au cas par cas. Les arguments qui jouent en faveur d'une REUE de ce type sont premièrement que l'exposition sera en général faible (circuit de refroidissement par exemple) et que l'Île-de-France est une région fortement

industrialisée. De plus, les industries sont « habituées » au fait de réutiliser de l'eau, puisque certaines d'entre elles recyclent leurs propres eaux usées.

L'utilisation d'eau épurée pour les centrales de production électrique présente plusieurs avantages : les volumes utilisés sont importants, la demande est concentrée en un endroit précis (ce qui devrait limiter les coûts liés au réseau) et les exigences sanitaires ne devraient pas être trop contraignantes. Mais la grande dimension de ce type de projet est à double tranchant car elle exige une volonté politique et un investissement matériel importants. Quant à la réutilisation pour les autres industries, elle est à envisager au cas par cas. Il est regrettable que la principale barrière soit l'absence de réglementation.

Utilisation pour des usages urbains

Dans le cas de Paris, on pourrait concevoir de substituer l'eau de Seine circulant dans le réseau « d'eau de service » par des eaux usées épurées. Ce changement d'approvisionnement dépend de l'utilité et de la volonté à arrêter d'utiliser des eaux de Seine. Il trouve son intérêt dans la préservation de la qualité de l'eau de la Seine dans Paris : l'arrêt des prélèvements augmenterait le débit et diminuerait d'autant la pollution. Le milieu récepteur initial des eaux usées réutilisées serait également protégé. Les exigences supplémentaires liées à la REUE auraient plusieurs avantages : la qualité de l'eau utilisée serait mieux connue et mieux contrôlée. L'utilisation pour les parcs et jardins, aujourd'hui marginale, pourrait se généraliser. De plus, le double réseau pourrait alimenter des immeubles et des bâtiments privés ou publics, comme c'est le cas dans plusieurs villes aux États-Unis et au Japon, pour des usages comme la climatisation, les toilettes, etc. Ce type de projet nécessite de construire un double réseau dans l'immeuble lui-même.

Mais la mise en place d'un tel projet nécessite des modifications importantes de la situation actuelle : il faudrait arrêter les trois usines de pompage, ou au moins leur trouver un autre usage - à ce sujet, on peut aussi imaginer un système « mixte » où des eaux usées épurées et des eaux de Seine pompées sont mélangées afin de servir d'eau de service. Des traitements supplémentaires devraient être mis en œuvre en plus du simple « dégrillage » que subissent les eaux de Seine actuellement. Enfin, la réhabilitation du réseau semble indispensable. Sa présence est une chance car l'installation d'un double réseau neuf dans Paris coûterait extrêmement cher, mais ce coût est à comparer à celui de la réhabilitation.

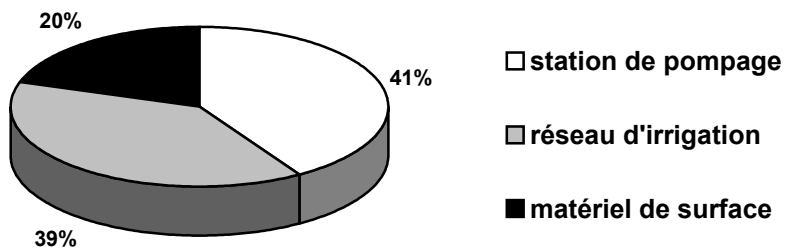
Rappelons également que les pompiers de Paris, comme c'est le cas dans beaucoup d'autres villes d'Île-de-France, utilisent de l'eau potable. L'utilisation d'eau épurée pour cet usage est envisageable mais l'absence de réglementation nationale est un handicap. Un autre usage possible, à la limite entre usage « urbain » et agricole, est l'irrigation de golfs. Il présente les avantages d'être soumis à une réglementation par l'intermédiaire des recommandations du CSHPF et d'avoir déjà été développé dans plusieurs villes de France, notamment dans le Midi. Il y a plus de 90 golfs en Île-de-France.

Utilisation pour l'eau potable

L'eau potable représente la plus grande part des prélèvements et de la consommation en Île-de-France, il peut donc paraître séduisant au premier abord de réutiliser les eaux usées pour cet usage. Mais il ne faut pas oublier que la motivation principale de la REUE en Île-de-France n'est pas de trouver un nouvel approvisionnement en eau, mais d'améliorer la qualité des masses d'eau par la diminution des rejets des stations d'épuration. Donc les activités qui prélèvent beaucoup ne sont pas automatiquement prioritaires. Deuxièmement, un projet de REUE pour l'eau potable entraîne beaucoup de contraintes, notamment parce que **le risque sanitaire potentiel est maximum**. Les coûts d'assainissement sont d'autant plus élevés. Par ailleurs, il paraît difficile de faire accepter ce mode de REUE auprès du public alors qu'il existe encore des réserves en eau et que d'autres types de réutilisations sont possibles. Enfin, les cas de REUE pour l'eau potable qui existent à l'étranger sont rares et ne concernent que des situations extrêmes. Il n'apparaît donc pas très judicieux de retenir ce mode de REUE pour une étude de faisabilité plus poussée. Il ne faut cependant pas oublier que localement, des conditions particulières peuvent rendre envisageable un projet de REUE pour l'eau potable.

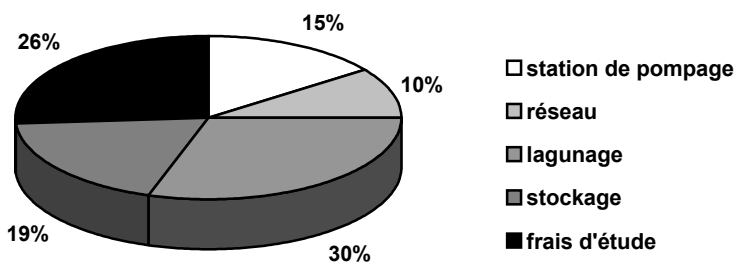
Par ailleurs, l'eau potable est souvent utilisée à des fins qui en réalité n'exigent pas ce niveau de qualité : il s'agit par exemple de l'arrosage chez les particuliers, des eaux de toilettes, des eaux de lavage, etc. On peut donc imaginer, dans ces cas-là, de remplacer l'eau potable par des eaux usées traitées ayant un niveau de qualité inférieur. Mais cette substitution exige une volonté politique forte car elle implique deux changements majeurs : un arrêt de l'utilisation d'eau potable, qui peut être perçu comme une régression (sanitaire, de qualité de vie, etc.) et l'utilisation d'eaux usées elle-même avec les réticences qu'elle implique auprès du grand public. Un tel projet devra donc être justifié par une situation écologique ou économique relativement critique, afin d'être accepté.

Figure 20. Répartition des coûts du projet de REUE de la baie du Mont Saint-Michel



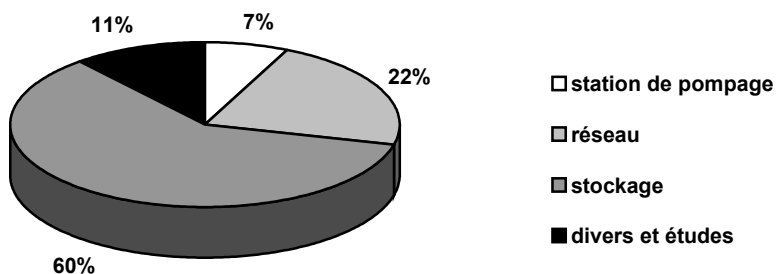
Source : Faby (1997), exploitation ORS

Figure 21. Répartition des coûts du projet de REUE de Mesnil-en-Vallée



Source : Faby (1997), exploitation ORS

Figure 22. Répartition des coûts du projet de REUE de Gidy



Source : Faby (1997), exploitation ORS

Autres considérations

Les coûts du projet

Faby (1997) donne quelques indications sur les coûts de certains projets de REUE en France. Mais il est difficile de les comparer car les postes financiers analysés ne sont pas les mêmes pour tous les projets. De plus, il s'agit la plupart du temps de projets ayant une dizaine d'années et les coûts en valeur absolue ne sont plus d'actualité. Cependant on peut, au sein d'un même projet, comparer les coûts relatifs de chaque poste. Dans les figures 20, 21 et 22 sont présentés les coûts de trois projets français de REUE agricole.

Les documents de synthèse sur les coûts de la REUE sont rares, comme le déplore Asano (1998). Cependant, on peut classiquement répartir les coûts entre :

- les études d'avant-projet ;
- l'aménagement de la station d'épuration, qui dépend essentiellement du niveau de traitement : par exemple le coût d'un traitement extensif est en général de 10 à 15 % moins cher qu'un traitement intensif équivalent (Asano, 1998) ;
- la mise en place du réseau ;
- les installations nécessaires à la réutilisation : matériel d'irrigation, etc. ;
- les coûts de fonctionnement ;
- éventuellement, les coûts d'une surveillance sanitaire.

Les postes les plus importants sont en général ceux de l'aménagement de la station d'épuration et de la mise en place du réseau et des réservoirs de stockage. Le coût des études préliminaires est très variable et dépend du contexte local.

La répartition des coûts entre les différents acteurs du projet se pose également. Quelle doit être la part des collectivités locales, des acteurs privés, etc. ? Remarquons que dans la quasi-totalité des cas français, les projets et donc leurs coûts sont formalisés de manière contractuelle entre une collectivité locale et un groupe d'intérêt, sous forme d'association ou de syndicat.

L'enquête et l'information des usagers

Dans le cas d'une étude de faisabilité détaillée, Faby conseille de collecter les informations suivantes :

- les usages spécifiques envisagés pour les eaux usées ;
- la nature des usagers (privé, public, entreprises, association, etc.) ;
- estimation des besoins actuels et futurs ;
- qualité requise pour ces usages ;
- modifications des structures existantes pour la REUE et coût de ces modifications ;
- participation de l'utilisateur à ces coûts et aux coûts de fonctionnement ;
- délai d'amortissement souhaité, économie prévue sur le coût de l'eau ;
- risque de modifications de l'occupation des sols ;
- disposition des usagers à utiliser ces eaux usées.

L'information des usagers est également essentielle à un projet de REUE. Il faut les renseigner sur les contraintes spécifiques de la REUE, sur la qualité des eaux épurées, sur la fiabilité de la ressource, la modification des coûts, les économies éventuelles, etc.

Le suivi sanitaire

La mise en place d'un suivi sanitaire tel que celui de Clermont-Ferrand (Devaux, 1999) serait extrêmement intéressant pour les projets de REUE novateurs en France, comme les projets urbains ou industriels. Ces suivis, en enrichissant les connaissances sur les risques sanitaires d'une REUE, pourraient faciliter l'acceptation du projet par les autorités sanitaires et aider à l'élaboration d'une réglementation spécifique. Pour les projets agricoles, cela semble moins essentiel car il existe déjà une réglementation et de nombreuses études scientifiques.

Conclusion

Entreprendre un projet de REUE est une démarche longue et délicate. Les eaux usées brutes sont très concentrées en polluants et leur utilisation présente un risque sanitaire potentiel élevé. Mais il existe des traitements suffisamment puissants pour permettre d'abaisser les concentrations en polluants, et donc le risque sanitaire, à un niveau acceptable. La qualité obtenue est même parfois meilleure que celle d'approvisionnements plus conventionnels (rivières, sources, etc.). Les eaux usées épurées permettraient de couvrir toute une gamme de besoins : agriculture, usages industriels, domestiques, etc. Chaque besoin a des exigences différentes en terme de qualité. Il existe dans plusieurs pays, ainsi qu'au niveau international, différentes réglementations qui déterminent ces niveaux de qualité en fonction des risques sanitaires inhérents à ces usages.

Une opération de REUE peut être une réponse à deux types de situations critiques : la rareté des ressources en eau et la mauvaise qualité des masses d'eau naturelles. En Île-de-France, la qualité des masses d'eau est problématique ; cette mauvaise qualité se paie (traitements plus importants) et cela se répercute dans le coût de la ressource, dont l'augmentation pourrait être une cause de la réutilisation des eaux usées épurées. Par contre, l'Île-de-France ne souffre pas d'un déficit en eau actuellement et ne s'attend pas à des difficultés pour l'approvisionnement en eau dans les 15 ans à venir (Metropolis, 2002). La motivation principale de la REUE dans la région n'est donc pas le manque d'eau, mais l'amélioration de la qualité des masses d'eau : **l'objectif de la REUE en Île-de-France n'est pas de diminuer les prélèvements mais de limiter les rejets.**

Partant de cette constatation, il apparaît donc que l'essentiel est de **détourner** les rejets des stations d'épuration et que l'usage final est « secondaire ». C'est-à-dire que l'on peut se permettre de choisir l'usage le plus simple à mettre en œuvre, à partir du moment où les eaux utilisables ont une qualité suffisante d'un point de vue technique et sanitaire. La réutilisation agricole, pour laquelle il existe une réglementation nationale et de nombreux exemples en France, devrait être la plus simple à réaliser. Pour tous les autres usages il n'y a ni réglementation ni expériences similaires en France. Quand ce sera possible, **il apparaît donc plus intéressant de préconiser une REUE agricole.** Cette option est à nuancer :

- d'un point de vue régional, car l'agriculture n'est pas l'activité qui consomme le plus d'eau, donc le volume d'eau détournée pour l'irrigation sera peut-être insuffisant par rapport aux objectifs d'amélioration de la qualité écologique des masses d'eau ;
- d'un point de vue local : il se peut qu'une réutilisation autre qu'agricole se révèle plus intéressante dans certains cas (d'un point de vue économique, écologique, etc.).

Des autres usages, la REUE industrielle et la REUE à usage urbain sont à étudier soigneusement et peuvent se révéler extrêmement intéressantes. Cependant, l'absence de réglementation est un sérieux handicap qui ne peut être surmonté que par une volonté politique. Mais si la situation réglementaire se « débloque », **ces applications seraient tout à fait envisageables, étant donné que les aspects techniques et sanitaires sont déjà connus et maîtrisés par de nombreux pays.**

Pour conclure, nous emprunterons ces quelques lignes à Faby (1997) : « La réutilisation des eaux usées épurées n'est pas assez exploitée comme pratique d'assainissement et de sauvegarde de la qualité sanitaire et écologique des milieux récepteurs ordinaires. Les exigences croissantes relatives à la qualité des milieux récepteurs sensibles devraient être l'occasion de montrer qu'il y a souvent avantage à trouver d'autres destins aux eaux usées que leur rejet dans le milieu récepteur. »

Bibliographie

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), École nationale vétérinaire de Nantes, ministère de l'Agriculture et de la Pêche, École nationale de la santé publique (ENSP). Les germes pathogènes dans les boues résiduelles des stations d'épuration urbaines, *Guide et cahiers techniques « Connaitre pour agir »*, août 1994, 89 pages.

Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN), Direction régionale de l'environnement d'Île-de-France. District hydrographique Seine-Normandie – Éléments préparatoire à l'état des lieux au titre de la directive cadre européenne sur l'eau – Document interbassin Île-de-France. *Document de travail*, janvier 2002, 90 pages.

Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN), Direction régionale de l'environnement d'Île-de-France. État des lieux du bassin – Seine et cours d'eaux côtiers normands. *Document de travail*, novembre 2003, 121 pages.

Albrechtsen H.J. Microbiological investigations of rainwater and graywater collected for toilet flushing. *Water Sci. Technol*, 2002, 46 (6-7) : 311-6.

Asano T. Wastewater reclamation and reuse. *Water quality management library*, 1998, 1475 pages.

Blumenthal U.J., Mara D.D., Peasey A., Ruiz-Palacios G., Stott R. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines. *Bull. World Health Organ.*, 2000, 78(9) : 1104-16.

Bontoux L. Municipal wastewater, public health and environment. *Institute for Prospective Technological Report*, octobre 1997, 18, 6 pages.

Boudan V., Chaud P., Quénel P., Bateau A., Cardoso T., Champenois B. Étude de l'imprégnation par le mercure de la population de Sinnamary. *Institut de veille sanitaire – Direction générale de la santé et du développement social de Guyane*, juillet 2004, 48 pages.

Cauchi, Hyvrard, Nakache, Schwartzbrod, Zagury, Baron, Carre, Courtois, Denis, Dernet, Larbaigt, Derangere, Martigne, Seguret. Dossier : la réutilisation des eaux usées après épuration. *Techniques, Sciences et Méthodes*, 1996, 2 : 81-118.

Crook J., Surampalli R.Y. Water reclamation and reuse criteria in the U.S. *Water Science and Technology*, 1996, 33 (10-11) : 451-462.

Crook J., MacDonald J.A., Trussell R.R. Potable use of reclaimed water. *Journal of the American water work association*, 1999, 91(8) : 40-49.

De Gouvello B., Berthineau B., Croum I., François C. La récupération et l'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment. Les enseignements de suivis in situ et d'un dispositif expérimental. *5^e conférence internationale Novatech sur les Techniques et Stratégies Durables pour la Gestion des Eaux Urbaines par Temps de Pluie*, juin 2004, 8 pages.

Devaux I. Intérêts et limites de la mise en place d'un suivi sanitaire dans le cadre de la réutilisation agricole des eaux usées traitées de l'agglomération clermontoise. *Thèse « Sciences de la Vie et de la Santé »*, univ. Joseph Fourier, Grenoble, 1999, 257 pages.

Direction régionale de l'environnement d'Île-de-France (DIREN). Aqualité n°2, Cachan, décembre 2000, 12 pages.

Ecosse D. Techniques alternatives en vue de subvenir à la pénurie d'eau dans le monde. *Mém. D.E.S.S. « Qualité et Gestion de l'Eau »*, Fac. Sciences, Amiens, 2001, 62 pages.

Faby J.A., Brissaud F. L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. *Office International de l'Eau*, 1997, 76 pages.

Fazio A. Principe et performances de la filière de traitement et de réutilisation des eaux résiduaires urbaines. *Colloque de Noirmoutier*, 24 septembre 2001, 10 pages.

Fonds national pour le développement des adductions d'eau (FNDAE), Direction générale de la forêt et des affaires rurales. Situation de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement des communes rurales en 2000 – Synthèse nationale et résultats départementaux. 2000, 43 pages.

Froese K.L., Kindzierski W.B. Health effects associated with wastewater treatment, disposal, and reuse. *Water environment research*, 1998, 70(4) : 962-968.

Fujioka R.S., Chin R.D. The Microbiological Quality of Cistern Water in the Tantalus Area of Honolulu, Hawaii. *3rd International Rainwater Cistern System Conference*, janvier 1987.

Gérin M., Gosselin P., Cordier S., Viau C., Quénel P., Dewailly E. Environnement et santé publique – Fondements et pratiques. *Tech&Doc*, 2003, Canada, 1023 pages.

Gould J. Is Rainwater Safe to Drink ? A Review of Recent Findings. *9th International Rainwater Catchment System Conference*, juillet 1999.

Haerber R.H., Waller D.H. Water Quality of Rain Water Collection Systems in the Eastern Caribbean. *3rd International Rainwater Cistern System Conference*, janvier 1987.

Haeghebaert S., Bouvet P., De Valk H. Les fièvres typhoïdes et paratyphoïdes en France en 2001. *BEH*, 2003, 14 : 77-79.

Hollander R., Bullermann M., Gross C., Hartung H., König K., Lucke F.K., Nolde E. Microbiological public health aspects in the use of rain water as water reservoirs for toilet flushing, garden irrigation and laundry. *Gesundheitswesen*, mai 1996, 58 (5) : 288-93.

Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Île-de-France (IAURIF), Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE). Territoire et population. *Atlas des Franciliens*, 2000, tome I, 81 pages.

InVS, Institut de Veille Sanitaire. Surveillance nationale des maladies infectieuses, 1998-2000. *InVS*, 2003, 341 pages.

Junger J.F. The reuse of urban waste water in agriculture : European Research on Treated Wastewater Reuse in Agriculture. *Urban Technology Network Project 10th*, 2000, 7 pages.

Krampitz E.S., Hollander R. Longevity of pathogenic bacteria especially Salmonella in cistern water. *Zentl. bl. Hyg. Umweltmed*, 1999, 202(5) : 389-97.

Lazarova V., Gaid A., Rodriguez-Gonzales J., Alday Ansola J. L'intérêt de la réutilisation des eaux usées : analyses d'exemples mondiaux. *Techniques, Sciences et Méthodes*, 2003, 9 : 64-85.

Lunn M. The deliberate indirect wastewater reuse scheme at Essex & Suffolk Water. *Colloque de Noirmoutier*, 24 septembre 2001, 4 pages.

Mara D.D., Cairncross S. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture – Executive summary. *World Health Organization*, 1989, 20 pages

Marsalek J., Schaefer K., Exall K., Brannen L., Aidun B. Réutilisation et recyclage de l'eau. Conseil canadien des ministres de l'environnement, Winnipeg (Manitoba). *Série d'ateliers du CCME sur les sciences de l'eau et les politiques*, 2002, compte-rendu n°3, 46 pages.

Masséna P. A. Valorisation des eaux usées en irrigation localisée. *Office international de l'eau*, 2001, 14 pages.

Metropolis (World Association of the Major Metropolises). Enhancing and maintaining water quality for metropolises, *Metropolis commission 3*, mai 2002, 95 pages.

Miquel G. La qualité de l'eau et de l'assainissement en France. *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, 2003, tome I, 198 pages.

Owen M.C.R., Gerba C.P. A Case History of Disinfection of Water in Rural Areas of Mexico. *3rd International Rainwater Cistern System Conference*, janvier 1987.

Puil C. La réutilisation des eaux usées urbaines après épuration. *Mém. D.U.E.S.S. « Eau et Environnement »*, D.E.P., univ. Picardie, Amiens, 1998, 62 pages.

Parashar U.D., Hummelman E.G., Bresee J.S., Miller M.A., Glass R.I. Global illness and deaths caused by rotavirus disease in children. *Emerging Infectious Diseases*, 2003, 9(5).

Réseau National des Données sur l'Eau (RNDE), Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Institut Français de l'Environnement (IFEN), Office International de l'eau (OIE), Agences de l'eau . Les prélèvements d'eau en France en 2001, Mars 2004, version 3, 56 pages.

Rose J.B., Farrah S.R., Friedman D., Riley K., Hamann C.L., Robbins M. Public evaluation of advanced water for potable application. *Water Science and Technology*, 1999, 40 (4-5) : 247-252.

Scott R.S., Waller D.H. Water quality aspect of a rain water cistern system in Nova Scotia, Canada. *3rd International Rainwater Cistern System Conference*, janvier 1987.

Sheikh B., Cooper R.C., Israel K.E. Hygienic evaluation of reclaimed water used to irrigate food crops – a case study. *Water Science and Technology*, 1999, 40 (4-5) : 261-267.

Shuval H., Lampert Y., Fattal B. Development of a risk assessment approach for evaluating wastewater reuse standards for agriculture. *Water Science and Technology*, 1997, 35 (11-12) : 15-20.

Tanaka H., Asano T., Schroeder E.D., Tchobanoglous G. Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data. *Water Environment Research*, 1998, 70(1) : 39-51.

Taraba J.L., Holmes E., Ilvento T.W., Heaton L.M. Water quality in Kentucky : cisterns for Kentucky. University of Kentucky – College of Agriculture.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). Guidelines for Water Reuse. 1992 : 245 pages.

Vilagines R. Eau, environnement et santé publique. *Introduction à l'hydrologie*, 2è édition, Editions Tec&Doc, 2003, 198 pages.

site personnel : http://perso.wanadoo.fr/bernard.pironin/aquatech/index_1.htm

site des réseaux de mesure de la qualité de l'air en Lorraine <http://www.atmolor.org>

site de la société Dr.Theiss – Naturwaren : <http://www.naturwaren.fr>

site d'information sur l'économie et l'eau : <http://www.waternunc.com/index.php>

site du Centre d'information sur l'eau (CIEAU) : <http://www.cieau.com/accueil.htm>

site du CIEPE : <http://www.ccip.fr/bourse-des-dechets/>

site de la mairie de Paris : <http://www.paris.fr/>

site de ministère de la Santé du Canada : www.hc-sc.gc.ca

site de l'Office international de l'eau (OIE) : <http://www.oieau.fr/index.htm>

site de l'Office québécois de la langue française : <http://www.olf.gouv.qc.ca/>

site du Réseau national des données sur l'eau (RNDE) : <http://www.rnde.tm.fr/>

site du SEDIF : <http://www.sedif.com/>

site du SIAAP : [www.http://www.siaap.fr/site.php](http://www.siaap.fr/site.php)

Annexes

Annexe 1

Impact sanitaire de l'utilisation des eaux de pluie

La récupération des eaux de pluie la plus commune, et qui est l'objet de la plupart des études référencées ci-dessous, consiste en la récupération des eaux de toitures et autres surfaces imperméables d'un bâtiment (cours intérieure, etc.). Les eaux de pluie sont récupérées dans des citernes où elles sont stockées un certain temps avant d'être utilisées pour les eaux de toilettes, l'arrosage, etc.

Sources de contamination

Arrivée au sol, l'eau de pluie s'évapore (61 %), s'infiltré (23 %) ou ruisselle (16 %) (moyenne pour la France, Miquel, 2003). Ces valeurs dépendent de paramètres comme la nature du sol, la température, l'intensité des précipitations, etc. La perméabilité du sol est de première importance. Dans un système d'utilisation des eaux de pluie (UEP), celles-ci peuvent être contaminées par plusieurs sources :

L'atmosphère, qui peut contenir des polluants atmosphériques comme des métaux lourds ou des produits chimiques organiques (organochlorés, organophosphorés, pesticides, herbicides, etc.). Les zones les plus concernées sont les zones à proximité des villes (circulation) et à proximité de sites industriels. 15 à 25 % de la pollution des eaux de pluie est imputable à la pollution atmosphérique (Miquel, 2003). Aux États-Unis, la législation déconseille d'utiliser les eaux de pluie comme ressource brute pour l'eau potable dans un rayon de 48 km autour des centres-villes (Gould, 1999).

En **ruisselant**, l'eau va récupérer divers polluants sous forme particulaire. Ces particules vont être mises en suspension et augmenter la turbidité de l'eau. 75 à 85 % de la pollution des eaux de pluie sont imputables au ruissellement (Miquel, 2003). Les surfaces imperméables (toiture, voiries, etc.) peuvent être contaminées par les feuilles des arbres, les cendres de cheminées (industrielles ou de maisons de particuliers), les déjections d'oiseaux, les dépôts de métaux lourds, etc. La pollution lors du ruissellement est particulièrement forte en milieu urbain, qui concentre de nombreuses surfaces imperméables, vulnérables à la corrosion (plomb, zinc) et où se dépose la pollution automobile et industrielle. Par exemple, dans les années 90, avant l'interdiction du plomb dans l'essence, c'est pas moins de 100 g/ha qui se déposaient chaque année dans Lyon, soit 6 tonnes de plomb pour toute l'agglomération ! De même, à Paris, l'eau

de pluie qui arrive, après ruissellement, dans la Seine est 20 fois plus chargée en plomb et 150 fois plus chargée en zinc que l'eau météoriteⁱ (Miquel, 2003). Cette constatation met en évidence l'importance d'un captage à la source des eaux de pluie en vue d'une UEP, afin de limiter le temps de ruissellement et donc la pollution.

La **citerne** de stockage où peuvent se développer des micro-organismes dans les sédiments, ou si la citerne est mal nettoyée. Les citernes peuvent être en béton, en fibre de verre, en plastique ou en métal. Ces dernières sont évitées à cause des problèmes de rouille, même s'il s'agit des moins chères (Taraba).

Analyses d'eau de citerne

Plusieurs études mettent en évidence la **présence de pathogènes** dans les eaux de pluie. Ainsi, Crabtree *et coll.* (1996) ont détecté *Cryptosporidium* et *Giardia* dans des échantillons d'eau de citerne. A l'université du Kentucky du Nord, des analyses d'eau de citerne ont révélé la présence de bactéries hétérotrophes opportunistesⁱⁱ (Taraba). Albrechtsen (2002) a détecté des micro-organismes pathogènes dans des eaux de pluie récupérées pour les toilettes (*Aeromonas*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella*, *Campylobacter*, *Mycobacterium* et *Cryptosporidium*).

L'origine de la contamination bactérienne est essentiellement animale, comme l'ont démontré Fujioka et Chin (1987), en analysant des eaux de citerne à Honolulu, Hawaï. Le rapport streptocoques fécaux sur coliformes totaux permet de déterminer l'origine de la contamination, humaine ou animale ; ici, les déjections d'oiseaux sont la première source de contamination.

Des chercheurs ont comparé les quantités de micro-organismes trouvées par rapport aux normes sanitaires de différentes eaux (eau potable, de baignade, etc.). Il ressort de ces différentes études que dans la plupart des cas, **si les normes « eau potable » ne sont pas toujours respectées, les normes « eau de baignade » sont elles rarement dépassées, et ceci jamais de manière significative.**

ⁱ eau météorite : eau de pluie qui n'a pas encore atteint le sol

ⁱⁱ bactéries opportunistes : bactéries qui sont pathogènes pour des individus fragiles comme des déficients immunitaires ou des personnes suivant des traitements antibiotiques lourds ou des traitements anticancéreux

Dans l'étude française menée par le CSTB (de Gouvello *et coll.*, 2004), la valeur guide « eau de baignade » pour les coliformes totaux a été dépassée une fois, mais jamais la valeur impérative. Des salmonelles ont été détectées une fois également. Mis à part ces deux incidents, la qualité de l'eau était toujours celle d'une eau de baignade.

Une étude allemande (Hollander *et coll.*, 1996) très complète mérite également d'être signalée. 1600 échantillons ont été prélevés dans 102 citernes faisant partie de systèmes d'UEP pour l'arrosage, les toilettes et le lavage du linge. L'analyse microbiologique consistait en la recherche de *E. Coli*, *Yersinia*, *Pseudomonas aeruginosa*, staphylocoques, *Salmonella*, shigelle, légionnelle ainsi que des coliformes totaux, des streptocoques fécaux et des levures. Les taux de micro-organismes trouvés étaient plus bas pour les citernes en plastique que pour les citernes en ciment ou en briques. 11 % des échantillons contenaient *Pseudomonas aeruginosa* et un échantillon seulement des salmonelles. Ce sont les seuls pathogènes retrouvés. Dans plus de 95 % des cas, la qualité correspondait aux normes « eaux de baignade » de la Communauté européenne.

Pour ce qui est du risque chimique, **le problème principal semble être le pH**. La pluie est naturellement légèrement acide (pH = 5 à 5,6), mais dans certaines parties industrialisées du globe (Amérique du Nord, Europe du Nord dont l'Île-de-France) l'activité industrielle génère une pollution acide de la pluie : on parle des *pluies acides*. Dans les travaux de De Gouvello *et coll.* (2004), le pH pose problème sur le site de Meillonas, où il n'est pas conforme aux eaux de baignade. L'étude de l'université du Kentucky du Nord (*in* Taraba) démontre également une acidité trop élevée pour les eaux pluviales (pH = 4,3). La cause de cette acidité est la présence d'acide nitrique et d'acide sulfurique. Ces deux acides se retrouvent dans l'eau de pluie par deux voies différentes : d'une part ils contaminent l'eau dans l'atmosphère, et retombent au sol avec l'eau météorite (précipitations), d'autre part ils se déposent au sol sous forme de poussière, sur laquelle ruisselle l'eau pluviale (on parle de dépôt par temps sec, *dry fall*).

Le programme national d'évaluation des pluies acides aux États-Unis a calculé que le dépôt moyen d'acide sulfurique dû aux précipitations dans le Kentucky est de 25 kg/ha/an (moyenne sur 5 ans). Il est de 12,5 kg/ha/an pour l'acide nitrique. Dans un rayon de 80 km autour d'une source d'acide sulfurique ou d'acide nitrique, les dépôts dus aux précipitations augmentent de 5 à 25 %. A côté d'une source très importante (centrale électrique), l'augmentation pourrait atteindre 50 %. On estime que le dépôt par temps sec a la même valeur que le dépôt dû aux précipitations. Donc l'apport total vaut le double du dépôt dû aux précipitations. Si on se base sur ces estimations, la quantité calculée d'acide nitrique que l'on retrouve dans les citernes

étudiées varie de 0,5 à 0,8 ppmⁱ, ce qui est bien en-dessous des 10 ppm de la norme sanitaire américaine. Pour les sulfates, la concentration varie de 4 à 9 ppm, qui est aussi largement inférieure à la norme, qui est de 250 ppm.

Les éléments-traces métalliques ne semblent poser problème que dans les zones fortement industrialisées. Ainsi, dans une étude en Pennsylvanie (*in* Taraba), concernant une zone rurale exposée à la pollution d'une grande zone industrielle, 12 échantillons d'eau de citerne sur 83 avaient des niveaux en plomb et en calcium supérieurs aux normes de l'eau potable de la National Academy Science. Tous étaient mauvais pour le pH et la corrosivité selon les normes de l'EPA. Par contre, les autres études ne font pas état d'une qualité extrêmement préoccupante des eaux pluviales en ce qui concerne les métaux traces. Ainsi, dans les Caraïbes, Haerber et Waller (1987) ont analysé pendant 4 mois les paramètres physico-chimiques de l'eau de plusieurs citernes. Les quantités en métaux lourds ont beaucoup varié, tout en restant en-dessous des niveaux acceptables, sauf pour le fer et le plomb qui les ont dépassés de temps en temps. L'étude du CSTB (de Gouvello, 2004) a mis en évidence quelques petits dépassements pour les taux en fer, mais sans risques sanitaires.

Dans le cas particulier des toits, la fumée qui sort d'une cheminée peut déposer des cendres et de la suie qui contiennent des métaux lourds, de la matière organique et des hydrocarbures poly-aromatique. Ces derniers sont cancérigènes, en particulier le benzo-a-pyrène (Taraba). Les matériaux dont est constituée la toiture ont aussi leur importance : des éléments en zinc ou en plomb peuvent contaminer l'eau qui ruisselle. **La nature de la cuve peut aussi modifier la qualité de l'eau.** Dans l'étude de De Gouvello (2004), le béton de la cuve du site de Petit-Quevilly semble avoir neutralisé l'acidité de la pluie. L'étude de Hollander (1996) a démontré que les micro-organismes sont plus nombreux dans les cuves en ciment ou en briques que dans les cuves en plastiques. Les citernes en maçonnerie réduisent la corrosivité de l'eau ce qui précipite les métaux lourds qui s'accumulent au fond de la citerne (Taraba). Enfin, Scott et Waller (1987) ont démontré que la concentration en calcium, l'alcalinité et le pH augmentent dans la cuve à cause du lessivage des parois.

ⁱ ppm : partie par million

Traitement

On peut se demander dans quelle mesure un traitement est approprié pour utiliser l'eau de pluie après récupération. Dans l'eau pluviale, 90 % de la pollution est sous forme solide, et non sous forme dissoute (Miquel, 2003). Cette caractéristique est importante. Elle conditionne les modes de traitements éventuels car la pollution solide peut être éliminée par aspiration, par filtration et surtout par décantation. On peut donc penser que **le stockage à lui seul peut suffire à traiter l'eau de pluie**, à condition que le prélèvement se fasse bien dans la partie supérieure de la cuve et non au fond de la cuve. A ce sujet, l'expérimentation de De Gouvello (2004) est particulièrement intéressante car on peut comparer la qualité de l'eau avant et après stockage. On remarque une amélioration de la qualité au niveau des MES, de la turbidité, du fer et de l'ammonium. Les résultats sont plus mitigés en ce qui concerne les micro-organismes, mais il faut rappeler que les dépassements des normes « eaux de baignades » sont très rares.

Une étude sur le développement et la prolifération des micro-organismes dans les cuves de stockage d'eau pluviale a été faite par Krampitz et Hollander (1999). Ils ont prouvé que les colonies de bactéries pathogènes *Salmonelle*, *Yersinia* et *Campylobacter* qui peuvent être éventuellement présentes dans les citernes **ne peuvent pas se développer et proliférer**, même en présence de matière organique (fèces de pigeon par exemple) et à quelques températures que ce soit (5, 15, 20 ou 37°C). Ils concluent que « il peut être confirmé que les quantités croissantes de matière organique, les fèces de pigeon, accompagnées d'une température optimale qui peuvent être observées accidentellement dans les citernes d'eau de pluie ne peuvent pas augmenter la croissance des bactérie entériques pathogènes ». Si on observe une augmentation de la quantité de micro-organismes, c'est qu'elle vient de l'extérieur.

Dans les cas où un traitement peut sembler nécessaire, parmi ceux préconisés par Taraba, il y a l'installation d'une pompe à chlore pour maintenir en continu un certain niveau de chlore dans la citerne, ou encore... une machine à nettoyer les toits ! Owen et Gerba (1987) ont recouvert la paroi intérieure des cuves d'un enduit constitué d'argent dans une matrice protéique. Cet enduit se dissout lentement et permet de désinfecter l'eau pendant une longue période. Enfin, le traitement spécifique du premier flot n'est pas très utile. Le premier flot est effectivement plus chargé en substances chimiques et en métaux lourds, mais il n'est pas suffisamment intéressant de le détourner pour maintenir la qualité sanitaire de la cuve (Scott et Waller 1987).

Conclusion

Pour conclure, on constate que si la qualité « eau potable » ne peut pas être assurée pour des eaux de pluie récupérées, par contre la qualité eau de baignade est très largement atteinte. **La UEP pour des usages autres que la consommation humaine est donc tout à fait envisageable.** C'est en sens que conclut Hollander (1996) lorsqu'il écrit : « Si certaines précautions sont prises, telle qu'une stricte séparation des conduites pour l'eau potable et l'eau de pluie, ainsi qu'un marquage correct des tuyaux et de la robinetterie, l'usage de l'eau de pluie pour les chasses d'eau, l'arrosage de jardin et le lavage du linge ne présente aucun risque inacceptable pour la santé publique ».

Annexe 2

Étude du CSTB sur la qualité des eaux de pluie

Cette étude a été réalisée par une équipe française du CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) réalisée par De Gouvello *et coll.* (2004) sur deux immeubles d'habitation, situés respectivement :

- au Meillonas (01) : il s'agit d'un bâtiment HQEⁱ construit en 1996-1997, de 12 logements. Les eaux récupérées sont les eaux de toitures. Le traitement est un dégrillage double. Le volume stocké est de 15 m³. 11 prélèvements ont été effectués ;
- au Petit-Quevilly (76) : il s'agit d'un bâtiment HQE de 39 logements. Le traitement est un filtre tourbillonnaire de 166 µm. Le volume stocké est de 20,5 m³. Les eaux de pluie sont colorées en bleu.

Les prélèvements ont été faits avant le stockage (points A et 1) et au niveau de la distribution (points 2 et B). D'après le tableau, les conclusions que l'on peut tirer sont les suivantes :

- seul le pH de Meillonas paraît problématique (il dépasse la norme eaux de baignade). Au Petit-Quevilly, le béton a sans doute neutralisé l'acidité naturelle de l'eau de pluie ;
- quelques petits dépassements en MES, en turbidité et en fer ont été observés, mais sans risques sanitaires ;
- au Petit-Quevilly, il y a eu une fois un dépassement pour les « coliformes totaux » de la valeur guide, mais pas de la valeur impérative ;
- à Meillonas, des salmonelles ont été détectées. Deux paramètres ont également dépassé les seuils de potabilité : la quantité de bactéries aérobies revivifiables et de *Pseudomonas Aeruginosa*.

Donc en conclusion, le bâtiment du Petit-Quevilly respecte toujours les normes « eaux de baignade », Meillonas pas toujours pour le pH et les Salmonelles. « Sur le plan qualitatif, l'utilisation d'eau de pluie n'apparaît pas induire de risque sanitaire direct pour l'usage WC. Il existe en revanche un risque sanitaire indirect en cas de piquage inopiné d'un robinet classique sur le réseau d'eau récupérée. »

ⁱ Haute Qualité Environnementale

Résultat de l'étude du CSTB

Les valeurs en **gras** indiquent un dépassement de la norme « eau potable » et celles en *italique gras* un dépassement de la norme « eau de baignade ».

	Seuil réglementaire		Petit Quevilly		Meillonas	
	« Eau potable »	« Eaux de baignade »	Point A	Point B	Point 1	Point 2
Paramètres physico-chimiques						
PH (unité pH)	6,5 - 9	6 - 9 (VI)	6,9 - 8,9	7,1 - 8,7	4,5 - 6,5	4,2 - 6,4
Conductivité (S/cm)	(400)		117 - 188	119 - 197	10 - 32	18 - 31
TH (°F)			3 - 8	4 - 7	<0,5 - 1,0	<0,5 - 1,0
TAC (°F)			2 - 7	3 - 5	<2	<2
MES (mg/l)	(0)		<0,1 - 0,8	<0,1	<2,0 - 3,9	1 - 3,3
Turbidité (NTU)	2		0,8 - 2,0	1,3	0,7 - 3,4	0,6 - 1,8
COT (mg/l)			<0,03	<0,03	0,75 - 1,58	0,33 - 1,37
Fer (mg/l)	0,20		<0,1 - 0,12	<0,1 - 0,12	<0,05 - 0,32	<0,05 - 0,24
Cuivre (mg/l)	1,0		<0,05	<0,05 - 0,8	<0,05 - 0,18	<0,05 - 0,47
Ammonium (NH ₄) (mg/l)	0,5		<0,017 - 0,044	0,019 - 0,043	0,08 - 0,66	0,06 - 0,45
Paramètres bactériologiques						
Bact. Aéro. Revi. a 22°C après 72h (nb/ml)	100		56 - 480	Tapis/100 ml	166 - 8800	170 - 3500
Bact. Aéro. Revi. a 37°C après 24h (nb/ml)	20		40 - 450	Tapis/100 ml	3 - 10400	6 - 5000
Levures (nb/100 ml)			0 - 35	5 - 40	4 - 210	9 - 160
Moisissures (nb/100 ml)					18 - >150	5 - >150
Pseudomonas aeruginosa (nb/100 ml)	0		0 - > 40	>50	0 - 120	0 - 7
Salmonelles (nb/5 l)	0/5 l	0/1 l (VI)	0	0	0 - 1/25 ml	0 - 1/25 ml
Coliformes totaux* (nb/100 ml)	0	500 (VG) 10 000 (VI)	30 - 1800	0 - Tapis	<30 - 230	12 - 92
Légionnelles			<50	<50	<50 - <100	<50 - <67

VI : Valeur Impérative - VG : Valeur Guide

*Dans le cas de Meillonas, le paramètre relevé est « coliformes thermotolérants »

Annexe 3

Listes d'études sur l'impact sanitaire d'une UEP

<p>Crabtree et coll. 1996 Caraïbes</p>	<p>The detection of <i>Cryptosporidium</i> oocysts and <i>Giardia</i> cysts in cistern water in the US Virgin Islands Contexte : la législation impose aux immeubles d'avoir des réservoirs destinés à récupérer l'eau de pluie. Analyse et résultats : 48 % des échantillons étaient positifs pour <i>Cryptosporidium</i>, 28 % pour <i>Giardia</i>, 57 % pour coliformes totaux et 36 % pour coliformes fécaux. Aucune corrélation entre le nombre de coliformes et le nombre de protozoaires n'a été mise en évidence. Si tous les cystes étaient viables, le risque de tomber malade serait de 10 %.</p>
<p>Albrechtsen 2002 Danemark</p>	<p>Microbiological investigations of rainwater and graywater collected for toilet flushing Contexte : comparaison de toilettes remplies par de l'eau potable ou par de l'eau de pluie. Analyse et résultat : qualité microbiologique similaire. Cependant, sur les 27 échantillons « eau de pluie », 12 contenait des micro-organismes pathogènes, alors qu'aucun échantillon « eau potable » n'en contenait. L'utilisation d'eau de pluie introduit donc un risque supplémentaire.</p>
<p>Wirojanagud 1987</p>	<p>Rainwater contamination Contexte : analyse de l'eau de pluie lors de son « parcours », du toit jusqu'à la citerne. Analyse et résultat : la qualité de la plupart des échantillons était en-dessous des normes « eau potable » de l'OMS (de 1971). Des espèces pathogènes ont été trouvées dans certains échantillons, donc cette étude indique une possible contamination bactérienne de l'eau de pluie stockée.</p>
<p>Fujioka et Chin 1987 Hawaï</p>	<p>The microbiological quality of cistern water in the Tantalus area of Honolulu, Hawaii Contexte : analyse sur 18 citernes des paramètres microbiologiques, turbidité et MES. Analyse et résultat : la quantité en MES et en sels dissous respectait les normes US pour l'eau potable. Par contre les normes microbiologiques sont souvent dépassées pour au moins un des trois indicateurs (coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux). La contamination provient essentiellement des déjections animales.</p>

<p>Haeber et Waller 1987 Caraïbes</p>	<p>Water quality of rain water collection systems in the Eastern Caribbean Contexte : analyses physico-chimiques et bactériologiques de citernes de récupération d'eau de pluie Analyse et résultat : les quantités de bactéries dépassaient parfois les normes canadiennes de l'eau potable, mais la plupart du temps elles étaient en-dessous des niveaux acceptables. Les quantités en métaux lourds ont beaucoup varié, tout en restant en-dessous des niveaux acceptables, sauf pour le fer et le plomb qui les ont dépassé de temps en temps. Les matériaux du toit, de la citerne et la maintenance influencent la qualité.</p>
<p>Ariyananda 1999 Sri Lanka</p>	<p>Comparative review of drinking water quality from different rain water harvesting systems in Sri Lanka Contexte : comparaison de la qualité de l'eau de pluie recueillie de manière traditionnelle avec le projet moderne de récupération et de traitement de l'eau. Analyse et résultat : avec les précaution adéquates, l'eau stockée ne dépasse pas les normes de potabilité de l'OMS pour le paramètre coliformes totaux. La qualité dépend essentiellement du stockage et de la maintenance.</p>
<p>Hollander et coll. 1996 Allemagne</p>	<p>Microbiological public health aspects in the use of rain water as water reservoirs for toilet flushing, garden irrigation and laundry Contexte : analyse de 102 citernes, 1600 échantillons dans plusieurs systèmes de récupération d'eau de pluie pour l'arrosage de jardins, les toilettes et le lavage du linge. Analyse microbiologique: recherche de E. Coli, coliformes totaux, streptocoques fécaux, Pseudomonas aeruginosa, staphylocoques, yersinia, salmonelle, shigelles, légionnelles et des levures. Analyse et résultat : 11 % des échantillons contenaient Pseudomonas aeruginosa, 1 échantillon seulement contenait des salmonelles. Dans plus de 95 % des cas, la qualité correspond aux normes « eaux de baignade » de l'UE. « La récupération de l'eau de pluie pour ces usages ne présente aucun risque inacceptable pour la santé publique ».</p>
<p>Scott et Waller 1987 Canada</p>	<p>Water quality aspects of a rain water cistern system in Nova Scotia, Canada Contexte : analyse pendant 2 ans des caractéristiques physiques, chimiques et bactériologiques de citernes de récupération d'eau de pluie. Analyse et résultat : la concentration en calcium, l'alcalinité et le pH sont augmentés par le lessivage des parois de la cuve. Les concentrations en potassium et en phosphate suivent les variations saisonnières des végétaux. L'accumulation de boue au fond de la cuve pourrait poser des problèmes sanitaires. La déviation du premier flux n'est pas nécessaire pour maintenir la qualité de l'eau.</p>
<p>Owen et Gerba 1987 Mexique</p>	<p>A case history of disinfection of water in rural areas of Mexico Contexte : le stockage à long terme peut entraîner des contaminations venues de l'extérieur ; le but est de tester une méthode alternative de désinfection : une couche d'argent dans une matrice protéique est appliquée sur les parois internes de la cuve. Analyse et résultat : la couche appliquée a permis une bonne désinfection pendant plus d'une année. L'efficacité de cette méthode a été confirmé par d'autres recherches.</p>

<p>Simmons et Heyworth 1999</p>	<p>Assessing the microbial health risks of potable water Contexte : donner des outils d'évaluation de la contamination microbienne et des risques dus à une récupération des eaux de pluie Analyse et résultat : les paramètres à prendre en compte sont notamment : le nombre de pathogènes dans le réservoir, leur capacité de survivre et de se multiplier, l'importance de l'exposition des individus, et le nombre de cas cliniques observés. Le schéma d'estimation du risque microbien permet une estimation systématique du risque pour la santé de la contamination d'un réservoir d'eau de pluie destinée à la consommation humaine et a d'importantes applications pour établir des normes microbienne pour l'eau de pluie potable.</p>
<p>Gould 1999</p>	<p>Is rainwater safe to drink ? A review of recent findings Contexte : revue des rares exemples d'épidémies dues à la consommation d'eau de pluie Analyse et résultat : bien que les risques soient faibles, ces exemples démontrent que des efforts doivent être entrepris pour minimiser les contaminations bactériennes. Plusieurs méthodes pour améliorer la qualité de l'eau produite sont brièvement décrites, comme la bonne conceptualisation du projet, la maintenance, dévier le premier flux et le traitement.</p>
<p>Krampitz et Hollander 1999 Allemagne</p>	<p>Longevity of pathogenic bacteria especially salmonella in cistern water Contexte : des citernes d'eau de pluie ont été volontairement infectées par des bactéries pathogènes : salmonelles, Yersinia, et Campylobacter. Aucune espèce n'a été capable de se développer, à 5, 15, 20 ou 37°C. Les colonies régressent d'autant plus vite que la température est élevée. L'ajout de composés organique (peptides bactériens ou fèces de pigeon) ralentit la disparition des colonies, mais ne l'empêche pas. Il est donc confirmé que l'ajout accidentel de matière organique (fèces d'oiseaux en général), qui a lieu parfois dans les citernes de récupération, n'augmente pas la quantité de bactéries pathogènes entériques.</p>
<p>Appan</p>	<p>Roof water collection systems in some Southeast Asian countries : status and water quality levels Contexte : en Asie du Sud-Est, l'eau ruisselant des toits est très souvent utilisée comme eau de consommation. Or, elle est souvent polluée par les matériaux des toits et par les saletés qui s'y déposent (déjections animales, poussière, etc.) Analyse et résultat : des échantillons prélevés dans beaucoup d'endroit sont positifs pour les coliformes fécaux et totaux, alors que la qualité physico-chimique est en général meilleure. La pollution bactériologique est d'origine animale (ratio coliformes fécaux/streptocoques fécaux). Les solutions envisagées sont de faire bouillir l'eau, d'utiliser des désinfectants domestiques (eau de Javel) ou de se servir des rayons du soleil.</p>

Taraba	Water quality in Kentucky : cisterns for Kentucky Contexte : analyse d'eau de citerne dans le Kentucky ; comparaison avec des résultats obtenus en dans le Tennessee, en Pennsylvanie et dans l'île Saint Martin (Antilles). Analyse et résultat : dans le Kentucky, 68 % des citernes contiennent des coliformes fécaux. Quelques unes contiennent des bactéries hétérotrophes opportunistes. Les eaux ont un pH bas (4,3) à cause de la présence d'acide sulfurique et d'acide nitrique. Les concentrations de ces deux acides étaient inférieures aux normes sanitaires américaines. Dans le Tennessee, le Kentucky et l'île Saint-Martin les concentrations en métaux lourds ont toujours été inférieures aux recommandations sanitaires. La qualité de l'eau se dégradait si elle passait la nuit dans les conduites. En Pennsylvanie, dans une zone rurale exposée à la pollution d'une grande zone industrielle, 12 échantillons d'eau de citerne sur 83 ont eu des niveaux en plomb et en calcium supérieurs aux normes de l'eau potable de la National Academy Science. Tous étaient mauvais pour le pH et la corrosivité selon l'EPA.
---------------	--

Annexe 4

Les micro-organismes pathogènes : quelques précisions

Les virus

Les **entérovirus** sont le plus souvent en cause. Ils peuvent survivre dans les eaux pendant quelques jours à quelques mois. Parmi eux, on distingue :

- le **poliovirus**, responsable de la poliomyélite, maladie à déclaration obligatoire (dernier cas déclaré en France en 1989) ;
- les **virus Coxsackie A et B** qui sont la première cause d'encéphalites bénignes mais aussi d'affections respiratoires. Les enfants âgés de moins de 10 ans sont particulièrement vulnérables et il est parfois observé des épidémies dans les crèches et les garderies ;
- l'**échovirus**, stable de nombreuses semaines en milieu liquide ; des épidémies sont également fréquentes dans les garderies.

En janvier 2000 a été mis en place au niveau national un réseau de surveillance des entérovirus (RSE). Il permet le recueil d'informations indiquant le nombre et le type de prélèvements reçus pour le diagnostic d'une infection à entérovirus, ainsi que le nombre de prélèvements positifs par type d'échantillon (InVS, 2003).

Les virus responsables des **hépatites A et E** sont également des virus intestinaux . Ils se transmettent par voie féco-orale et l'eau résiduaire peut être une source de contamination. Ainsi, en 1993-1994, une épidémie d'hépatite E à Islamabad, au Pakistan, a eu lieu à cause d'une défaillance du système de traitement des eaux (Rab *et coll.*, 1997, in Froese, 1998). Les épidémies sont liées aux conditions socio-économiques de chaque pays et dans les pays développés, le traitement des eaux urbaines et la surveillance des eaux de distribution permet d'éviter la contamination hydrique. Cependant, des cas peuvent survenir chez les voyageurs de retour de pays d'Asie ou d'Afrique (cas importés). Notons enfin que des épidémies peuvent survenir en relation avec la consommation d'aliments (coquillages).

Les **Rotavirus** sont la première cause de gastro-entérites chez les enfants de moins de 5 ans. Aux États-Unis, ils touchent 2,7 millions d'enfants et sont responsables de 150 décès par an

(Vilaginès, 2003). L'incidenceⁱ du Rotavirus est la même que ce soit dans les pays industrialisés et dans les pays en développement. Cependant dans les premiers, les décès sont beaucoup plus rares car les soins apportés (réhydratation) sont mieux accessibles. Il est estimé qu'environ 1 200 enfants meurent chaque jour d'une infection à Rotavirus et que 82% d'entre eux vivent dans des pays pauvres (Parashar, 2003).

Les bactéries

Les bactéries du genre **Salmonella**, responsables des fièvres typhoïdes et paratyphoïdes peuvent donner lieu à des complications graves aboutissant dans certains cas au décès. Les symptômes se caractérisent par de la fièvre, des diarrhées, des douleurs abdominales. Des matières fécales présentes dans l'eau sont une voie de contamination possible. Dans les pays industrialisés, ces maladies sont rares et la majorité des cas sont des cas importés (d'Afrique du Nord ou de zone tropicale essentiellement). Les fièvres typhoïdes et paratyphoïdes sont des maladies à déclaration obligatoire depuis 1903. En 2001, 92 cas de fièvres typhoïdes et paratyphoïdes sont apparus en France. L'incidence était de 0,15 pour 100 000 habitants (elle est inférieure à 1 cas pour 100 000 depuis la fin des années 1980) (Haeghebaert, 2003). En 2002, l'incidence était de 0,20 cas pour 100 000 habitants (Vilagines, 2003).

Le **choléra** (bactéries *Vibrio*) est une maladie qui se caractérise par une diarrhée s'accompagnant de vomissements et de douleurs gastriques. Elle peut être mortelle si un traitement antibiotique n'est pas apporté et en l'absence de réhydratation. La chloration de l'eau est indispensable pour éviter le risque d'apparition de la maladie. En 1996, un cas de choléra autochtone était déclaré en France métropolitaine certainement dû à la consommation d'un aliment importé et consommé insuffisamment cuit. Il s'agissait du 5^{ème} cas autochtone signalé depuis 1970 (1 cas en 1970 en Essonne, 2 cas en 1986 et 1 cas en 1993).

Les gastro-entérites et diarrhées sont provoquées par différentes **entérobactéries** telles que *Shigella*, *Yersinia*, *Escherichia coli* et *Campylobacter*.

Les shigelles sont des bactéries strictement humaines. Il en existe 4 espèces dont *Shigella dysenteriae* responsable de la dysenterie bacillaire qui est la forme la plus sévère des

ⁱ Le taux d'incidence est le nombre de nouveaux malades par unité de temps divisé par la taille de la population non malade pendant la période. L'unité de temps est le plus souvent l'année.

shigelloses, des complications (hypoglycémie et déshydratation) pouvant survenir et causer des formes graves voir mortelles. En France, c'est l'espèce *Shigella sonnei* qui est le plus souvent retrouvée. Elle serait responsable de 80% des shigelloses observées dans notre pays.

Parmi les différentes espèces de yersinia, *Y. enterocolitica* est responsable notamment de gastro-entérites. Elle a pour réservoir de nombreuses espèces animales (porcs, lapins, mulots). La contamination peut se produire par l'alimentation : lait, coquillage et crudités. Concernant l'eau, la contamination est oro-fécale.

Escherichia coli est une bactérie saprophyteⁱ du tube digestif de l'homme et des animaux. Elles se multiplient par milliards dans les matières fécales. Cependant elles sont peu pathogènes et le deviennent dans des situations particulières (pathogènes opportunistes).

Campylobacter a pour origine certains animaux (chiens, volailles...) susceptibles d'être à l'origine d'infections humaines. La consommation de lait et d'eau contaminés peut également être responsable. Les manifestations de la maladie sont de la fièvre, des crampes abdominales et de la diarrhée. Aux Etats-Unis, plus de 200 000 cas sont comptabilisés chaque année (Vilaginès, 2003). En France, les infections à *Campylobacter* font l'objet d'une surveillance épidémiologique (InVS, 2003).

ⁱ Elle vit au dépend de son hôte mais sans provoquer de maladie.

Annexe 5

Les procédés de désinfection : quelques précisions

Le chlore

Le chlore est un oxydant puissant qui réagit à la fois avec des molécules réduites et organiques, et avec les micro-organismes. Le chlore agit dans l'ordre suivant : il réagit premièrement avec des minéraux réducteurs comme le fer, le manganèse ou le cyanure. Puis il réagit avec les molécules organiques, ce qui donne des dérivés halogénés éventuellement cancérigènes. Ensuite, il peut réagir avec des composés azotés, ce qui donne des chloramines qui ont un pouvoir germicides. Et enfin, il s'attaque directement aux micro-organismes, notamment en perturbant l'activité enzymatique. L'action désinfectante du chlore est donc très réduite tant que toutes les autres molécules avec lesquelles il peut réagir n'ont pas été consommées. Donc les traitements de purification et de clarification en amont ont une très grande importance pour permettre une bonne efficacité du traitement, et éviter d'avoir à utiliser trop de chlore. D'autant plus que la déchloration, qui permet de limiter considérablement l'effet toxique de certains produits, coûte cher.

L'ozone

L'ozone est un procédé de désinfection utilisé aux Etats-Unis, en Afrique du Sud et au Moyen-Orient essentiellement. En France, seule la station de Saint-Michel-en-Grèves en est équipée à notre connaissance. L'ozone est produit par le passage d'un flux électrique dans de l'oxygène. Il réagit avec les composés minéraux réducteurs, avec la matière organique et les micro-organismes. Il permet l'élimination de la couleur à 90 %, un abattement de la DCO de 20 % (Langlais et al., 1992, in Cauchy, 1996) et une réoxygénation du milieu. Il permet l'élimination des bactéries, des virus et des protozoaires. C'est le seul procédé vraiment efficace contre les virus (Lazarova, 2003). Les tests de toxicité effectués sur des poissons, des crustacés et des algues n'ont pas permis de mettre en évidence une quelconque toxicité (Cauchy, 1996).

Les autres traitements chimiques

L'**acide peracétique** est un mélange d'acide acétique et de peroxyde d'hydrogène. Il libère de l'oxygène actif qui a une action désinfectante. Le produit dérivé est l'acide acétique, parfaitement biodégradable (c'est l'acide du vinaigre) ; il n'y a pas de formation de produits toxiques rémanents. L'activité germicide concerne surtout les germes témoins de contamination fécale (abattement de 3 unités logarithmiques (U log) pour 10 min et pour une dose de 5 à 7 mg/l, d'après Cauchy, 1996). Il a une activité virucide moindre.

Le **dioxyde de chlore** est notamment utilisé en Israël pour désinfecter l'eau d'irrigation des zones maraîchères. Il a une action virucide et bactéricide. Son action dépend du degré d'épuration préalable de l'eau. S'il est suffisant, les besoins en dioxyde de chlore peuvent être très faible, ce qui permet de diminuer fortement les atteintes au milieu tout en assurant une très bonne élimination des micro-organismes.

Les **ferrates** (FeO_4^{2-}) sont tout aussi efficace que le chlore et participent de plus à la coagulation et à l'élimination des phosphates.

Remarque : Il existe un traitement par membranes qui permet de filtrer également les substances dissoutes, en plus des MES et des micro-organismes : c'est l'osmose inverse. Ce procédé coûteux est utilisé pour désaliniser l'eau de mer afin de produire de l'eau douce.

Lagunage tertiaire

Le dimensionnement optimum est une profondeur de 0,80 à 1,50 m, suffisamment profond pour éviter le développement de végétaux aquatiques, tout en permettant la pénétration des UV dans tout le bassin. Il est conseillé d'utiliser 2 à 3 bassins plutôt qu'un bassin unique, avec une surface relative de $5\text{m}^2/\text{EH}$. Le temps de séjour optimum est de 30 jour (Cauchy, 1996).

Annexe 6

Éléments de la réglementation sur le traitement des eaux usées

Le texte suivant est extrait du site du CIEAU (centre d'information sur l'eau) : www.cieau.fr

Décret 94-469 du 3 juin 1994

Art. 14 alinéas 1 et 2 : Le préfet établit, pour chaque agglomération susceptible de produire une charge brute de pollution organique supérieure à 120 kg par jour, un document proposant les objectifs de réduction des flux de substances polluantes. Ces objectifs sont établis à partir des données permettant d'apprécier la sensibilité des milieux récepteurs aux pollutions.

Arrêté du 22 décembre 1994 (Prescriptions techniques)

Chapitre II - Prescriptions techniques particulières applicables aux nouveaux systèmes de traitement

Art. 12 : Les systèmes d'épuration doivent être dimensionnés, conçus, construits et exploités de manière telle qu'ils puissent recevoir et traiter les flux de matières polluantes correspondant à leur débit et leurs charges de référence. Ce dimensionnement tient compte : - des effluents non domestiques raccordés au réseau de collecte ; - des débits et des charges restitués par le système de collecte soit directement, soit par l'intermédiaire de ses ouvrages de stockage ; - des variations saisonnières de charge et de flux ; - de la production de boues correspondante.

Art. 14 alinéa 1 : Le(s) point(s) de rejet(s) est (sont) déterminé(s) de manière à réduire au maximum les effets des déversements sur les eaux réceptrices, notamment pour les prises d'eau utilisées pour la consommation humaine, les zones de baignade, les zones piscicoles et conchylicoles. Ce point de déversement ne doit en outre pas faire obstacle à l'écoulement des eaux. Toutes dispositions doivent être prises pour prévenir l'érosion du fond ou des berges, assurer le curage des dépôts et limiter leur formation.

Art. 17 : Les ouvrages sont implantés de manière à préserver les habitations et établissements recevant du public des nuisances de voisinage. Cette implantation doit tenir compte des extensions prévisibles des ouvrages ou des habitations.

Tableau 1

Paramètre	Concentration maximale	
DB05	25	mg/l
DC0	125	mg/l
MES	35 mg/l*	

* Pour les rejets dans le milieu naturel de bassins de lagunage, cette valeur est fixée à 150 mg/l.

Tableau 2

Paramètre	Charge brute de pollution organique reçue en kg par jour	Rendement minimum
DB05	120 à 600	70%
	> 600	80%
DC0	Toutes charges	75%
MES	Toutes charges	90%

Tableau 3

	Paramètre	Charge brute de pollution organique reçue en kg par jour	Concentration maximale
Zone sensible à l'azote	NGL*	600 à 6000 > 6000	15 mg/l 10 mg/l
Zone sensible au phosphore	PT	600 à 6000 > 6000	2 mg/l 1 mg/l

* Ces exigences se réfèrent à une température de l'eau du réacteur biologique aérobie de la station d'épuration d'au moins 12° C. Cette condition de température peut être remplacée par la fixation de périodes d'exigibilité déterminées en fonction des conditions climatiques régionales.

Tableau 4

	Paramètre	Charge brute de pollution organique reçue en kg par jour	Rendement minimum
Zone sensible à l'azote	NGL	> ou = 600	70%
Zone sensible au phosphore	PT	> ou = 600	80%

Chapitre V - Obligations de résultat - Systèmes de traitement

Art. 30 : I - Les dispositions figurant au présent article ne sont pas applicables au delà des débits et des charges pour lesquels l'installation est dimensionnée. II - L'arrêté d'autorisation fixe les valeurs limites de rejet provenant de stations d'épuration, fonctionnant dans des conditions normales, au vu du document d'incidence, des objectifs de qualité des milieux récepteurs, des usages à l'aval et de l'arrêté fixant les objectifs de dépollution de l'agglomération. Ces valeurs peuvent être évolutives. Elles ne peuvent être moins sévères que celles figurant en annexe II pour les ouvrages visés à l'article 9 du décret n° 94-469 du 3 juin 1994. L'arrêté d'autorisation peut prévoir des prescriptions différentes en fonction des périodes de l'année.

Règles générales applicables aux rejets en conditions normales d'exploitation pour des débits n'excédant pas leur débit de référence

Annexe II

I - Règles générales de conformité

Les échantillons moyens journaliers doivent respecter :

- soit les valeurs fixées en concentration figurant au tableau 1 ;
- soit les valeurs fixées en rendement figurant au tableau 2.

Ils ne doivent pas contenir de substances de nature à favoriser la manifestation d'odeurs. Leur pH doit être compris entre 6 et 8.5 et leur température inférieure à 25 °C. Les rejets dans des zones sensibles à l'eutrophisation doivent en outre respecter en moyenne annuelle :

- soit les valeurs du paramètre concerné, fixées en concentration, figurant au tableau 3 ;
- soit les valeurs du paramètre concerné, fixées en rendement, figurant au tableau 4.

En cas de modification du périmètre de ces zones, un arrêté complémentaire fixe les conditions de prise en compte de ces paramètres dans le délai prévu à l'article 13 du décret n° 94-469 du 3 juin 1994. Les valeurs des différents tableaux se réfèrent aux méthodes normalisées, sur échantillon homogénéisé, non filtré ni décanté. Toutefois, les analyses effectuées dans les installations de lagunage sont effectuées sur des échantillons filtrés, à l'exception des MES.

Tableau 5

Paramètre	Concentration maximale
DB05	50 mg/l
DC0	250 mg/l
MES	85 mg/l

Tableau 6

Nombre d'échantillons prélevés dans l'année	Nombre maximal d'échantillons non conformes
4-7	1
8-16	2
17-28	3
29-40	4
41-53	5
54-67	6
68-81	7
82-95	8
96-110	9
111-115	10
126-140	11
141-155	12
156-171	13
172-187	14
188-203	15
204-219	16
220-235	17
236-251	18
252-268	19
269-284	20
285-300	21
301-317	22
318-334	23
335-350	24
351-365	25

II - Règles de tolérance par rapport aux paramètres DC0, DBO5 et MES

Ces paramètres peuvent être jugés conformes si le nombre annuel d'échantillons journaliers non conformes à la fois aux seuils concernés des tableaux 1 et 2 ne dépasse pas le nombre prescrit au tableau 6. Ces paramètres doivent toutefois respecter le seuil du tableau 5.

III - Règles de tolérance par rapport au paramètre NGL

Le paramètre peut être jugé conforme si la valeur de la concentration de chaque échantillon journalier prélevé ne dépasse pas 20 mg/l.

IV - Règles de tolérance par rapport aux paramètres DC0, DB05 et MES.

Ces paramètres peuvent être jugés conformes si le nombre annuel d'échantillons journaliers non conformes à la fois aux seuils concernés des tableaux 1 et 2 ne dépasse pas le nombre prescrit au tableau 6. Ces paramètres doivent toutefois respecter le seuil du tableau 5.

V - Règles de tolérance par rapport au paramètre NGL.

Le paramètre peut être jugé conforme si la valeur de la concentration de chaque échantillon journalier prélevé ne dépasse pas 20mg/l.

Annexe 7

Les projets de REUE pour l'alimentation en eau potable

Windhoek, Namibie (REUE directe)

Il semble que le manque d'eau sera au XXI^e siècle le principal obstacle au développement socio-économique de l'Afrique du Sud. Ce pays a des précipitations irrégulières dans le temps et dans l'espace, les ressources en eau du sol sont difficilement accessibles ; de plus, les cours d'eau ne sont pas réguliers et beaucoup coulent de manière intermittente dans l'année. Donc la pollution est forte car il y a peu d'effet de dilution. Et la population et le taux d'industrialisation ne font qu'augmenter...

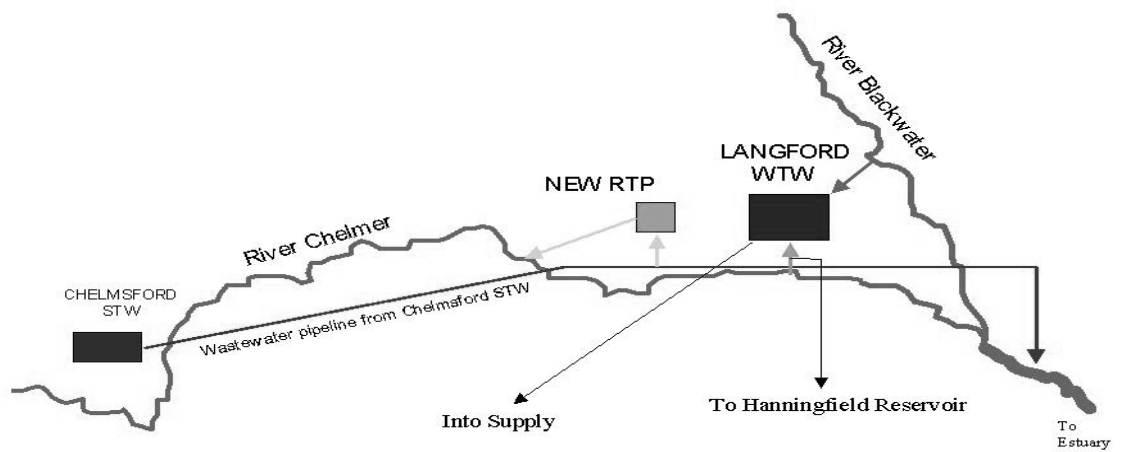
Les mesures alternatives (désalinisation, transport d'iceberg, déclenchement de précipitation, achat d'eau aux pays voisins) ne sont pas envisageables, car trop chères, à l'efficacité limitées et parfois politiquement sensibles, donc la REUE est très étudiée. Dès les années 60, un projet politique est né à partir du Water Act de 1956.

La capitale de la Namibie (pays sous administration sud-africaine), Windhoek, a du faire face dès la fin des années 60 à de sévères manques d'eau. La REUE pour l'eau potable a été la seule solution à court terme envisageable. Elle fonctionne depuis 25 ans, avec une eau de toujours bonne qualité. Le public a été informé tout le long de la mise en place du projet, et les oppositions du départ se sont estompées devant le succès des opérations et la qualité de l'eau distribuée. L'usine a un débit de 21 000 m³ par jour. La REUE est basée sur 3 principes :

- séparation des réseaux industriels et domestiques ;
- un traitement secondaire pour produire des effluents de qualité : biofiltration et réservoirs de maturation (entre 6 et 14 jours), élimination du phosphate ;
- un traitement avancé pour éliminer l'ammoniaque : flottation à l'air dissous.

La qualité de l'eau est suivie régulièrement par plusieurs experts indépendants. Une étude épidémiologique a été menée de 1976 à 1983, sur 75000 à 100000 personnes. Même si ce nombre n'est pas suffisant pour être statistiquement significatif, les résultats correspondent à ceux de l'OMS pour la population mondiale. Il aurait été préférable de les comparer aux données de la population namibienne, mais celles-ci n'existent pas.

Carte de la zone



STW : station d'épuration

RTP : nouvelle station de traitement

WTW : station de pompage et de potabilisation de l'eau

Le traitement de l'eau est le plus cher moyen d'obtenir de l'eau potable, c'est pourquoi l'usine ne tourne jamais à plein régime (27 % en moyenne entre 1968 et 1991, 80 % en 1982, année de sécheresse). L'eau traitée est ensuite mélangée à de l'eau de surface traitée « normalement », dans une proportion maximum de 50/50.

Chelmer, GB (REUE indirecte planifiée)

La compagnie Essex&Suffolk Water fournit de l'eau potable à 1,5 millions d'Anglais, dans la partie la plus sèche du pays. Elle dépend d'Ondeo, marque de Suez Environnement.

La majorité des clients vit à proximité d'Essex, et consomme quotidiennement 410 millions de litres d'eau potable. Prévision pour 2025 : 480 millions par jour. De plus, le comté d'Essex se situe dans la zone la plus sèche de l'Angleterre, et est même classé zone semi-aride par les Nations-Unies. Il faut donc trouver de nouvelles ressources, en plus des mesures prises pour limiter la consommation à 163 litres par personne et par jour (limitation des fuites, meilleur efficacité du système). Il a donc été décidé de recourir à la REUE, ce qui est révolutionnaire en Grande-Bretagne. Un agrandissement classique et les normes de plus en plus drastiques de rejets demandent entre 15 et 20 ans pour fournir 50 millions de litres de plus par jour, alors que la REUE permettrait de fournir 30 millions de plus en 5 ans. C'est ici clairement la réglementation sévère et le souci environnemental qui ont poussé à la REUE.

La ville de Chelmsford, 140 000 habitants, rejette chaque jour 30 millions de litres d'eaux usées, traités par une STEP qui rejette l'effluent dans un estuaire. Environ 14 % de ces eaux est d'origine industrielle, surtout agroalimentaires. Le tuyau qui rejette les eaux usées traitées passe à proximité d'une usine de traitement de l'eau, à Langford.

Les limites autorisées pour la STEP sont 10 mg/l d'ammoniaque, 20 mg/l de DBO et 40 mg/l de MES. Il est extrêmement rare que ces normes ne soient pas respectées. Des tests ont été menés sur l'impact des polluants sur la faune et la flore : par exemple, étude d'impact sur les perturbateurs endocriniens sur les poissons et leur cycle de vie. Les études menées sur la rivière Chelmer, le réservoir Hanningfield et sur la qualité de l'eau et ses effets sur la faune ont permis de collecter 4 ans de données.

Pendant la sécheresse de 1995 à l'automne 1997, il a été décidé de relier le tuyau de déversement des eaux usées à l'usine de traitement de Langford. Elles sont ensuite passées aux UV puis réinjectées dans les eaux de la rivière qui sont pompées pour alimenter le réservoir. Le projet a débuté le 27 juillet 1997.

Une certaine opposition est venue de la part d'une douzaine de personnes réunies en association et de journaux locaux. La proximité de la crise de la vache folle est en partie responsable. Puis, le Sunday Time a écrit un article malveillant et délibérément alarmiste en octobre 1997, ce qui a crispé les opinions. Mais la fièvre médiatique est vite retombée. Aucun effet sur la qualité de l'eau ou de l'environnement n'a été observé. L'opération s'est arrêtée fin 1998, date de l'expiration de l'autorisation.

Pour établir de manière permanente une réutilisation, il a donc fallu prendre plus en compte l'avis du public. Notamment, il a été constaté qu'il était visuellement plus rassurant de voir les effluents rejetés en rivière avant d'être pompés par l'usine de traitement. Après une consultation et une information du public par l'Environmental Agency, il a été accordé un permis pour 10 ans en avril 2000. Les plans ont été achevés en juin 2000, et la construction devrait s'être terminée en Avril 2002. Le procédé devrait normalement fonctionner entre avril et octobre. En effet, il est économiquement coûteux de toujours utiliser les eaux usées pour produire de l'eau potable.

Le traitement consiste à éliminer les nitrates, l'ammoniaque et les phosphates, responsables de l'eutrophisation, les oestrogènes qui sont des perturbateurs endocriniens, et les micro-organismes.

Annexe 8

Liste d'études sur les risques sanitaires de la REUE

Extraits de Devaux, 1999

Études générales

Bureau (1987) USA Californie	<p>Contexte : présentation de l'étude de faisabilité concernant l'utilisation des eaux usées urbaines, ayant subi un traitement tertiaire pour irriguer des cultures maraîchères destinées à être consommées crues (artichaut) « Monterey Wastewater Reclamation Study for Agriculture ».</p> <p>Résultat : l'étude a été menée sur 5 ans et n'a pas révélé de risque pour la santé publique associé à l'irrigation de légumes consommés crus avec des eaux usées domestiques purifiées.</p>
Vazquez–Monteil (1995) Portugal	<p>Contexte : au sud du Portugal, un effluent traité par lagunage est utilisé pour irriguer des champs de maïs. Sa composition est caractérisée en fonction de sa forte teneur en azote et en phosphore.</p> <p>Résultat : mise en évidence de la valeur fertilisante de l'effluent traité par une augmentation du rendement des cultures</p>
Vazquez–Monteil (1995) Mexico	<p>Contexte : les eaux usées de Mexico sont utilisées pour irriguer des cultures, après mélange avec des eaux de surfaces et souterraines.</p> <p>Résultats : le mélange d'eaux de sources différentes ne réduit pas le niveau élevé de Coliformes fécaux trouvés dans les eaux usées (10^7 ufc/100 ml). Les niveaux de métaux lourds détectés dans les eaux d'irrigation sont faibles, mais les effets possibles à long terme sont soulignés.</p>
Somiya (1995) Japon	<p>Objectif : les auteurs recherchent le potentiel génotoxique des eaux usées brutes et traitées afin d'en évaluer la dangerosité pour l'homme en cas de réutilisation de l'effluent</p> <p>Résultat : en utilisant des tests sensibles aux amines aromatiques, une génotoxicité a été mise en évidence dans l'effluent de chaque procédé de traitement. Les résultats montrent que les déjections humaines comportent des substances génotoxiques (Trp-P-2), qui peuvent être éliminées par un traitement biologique.</p>

<p>Peyster (1993) USA San Diego</p>	<p>Objectif : évaluer l'usage d'eaux usées épurées comme supplément aux ressources en eaux brutes, pour répondre aux besoins en eau potable de la ville de San Diego</p> <p>Méthode : des mesures de surveillance biologique ont été effectuées dans les tissus de poissons exposés : survie, croissance, performance de natation, recherche de 68 composés organique, 27 pesticides, 27 composés inorganiques</p> <p>Résultat : la surveillance biologique a révélé des différences après 90 et 180 jours d'exposition pour la survie, la croissance et les performances de natation. Les eaux usées épurées et les eaux potables n'étaient pas différentes après 28 jours de test chimique de bioaccumulation en terme de contaminants chimiques organiques dans les tissus des poissons, excepté pour les niveaux de pesticides, qui ont tendance à être plus élevés dans les eaux potables Les auteurs concluent que l'utilisation d'eaux usées épurées en supplément des ressources d'eaux brutes ne constituerait pas une menace pour la santé publique</p>
<p>Sheikh (1998) USA Californie</p>	<p>Contexte: les objectifs sont de tester la validité de la continuité du projet « Monterey Wastewater Reclamation Study for Agriculture » lancé en 1987 et de déterminer si des micro-organismes pathogènes, tels que <i>E. Coli 0157 : H7</i>, <i>Cyclospora</i>, les virus entériques et Salmonelles, sont présents ou non dans l'eau recyclée après désinfection tertiaire.</p> <p>Résultats : les analyses d'échantillons d'eau recyclée sont comparables à des données sur des ressources en eau de boisson. Aucune souche de Salmonelle, <i>Cyclospora</i>, et <i>E. Coli 0157 : H7</i> n'a été détectée dans les échantillons d'eau recyclée. Les auteurs concluent que l'eau recyclée, après un traitement tertiaire, est aussi saine pour l'irrigation des cultures que n'importe quelle autre source d'irrigation d'usage courant.</p>
<p>Rose (1999) Tampa, Floride</p>	<p>Contexte : construction d'une petite station d'épuration de démonstration pour tester l'efficacité de traitements tertiaires (chloration et autres traitement chimiques), dans la perspective d'une pallier aux besoins d'eau potable de la ville de Tampa.</p> <p>Résultats : 99,99 % des virus, 99,9999 % des bactéries et 99,9 % des protozoaires entériques sont éliminés. <i>Cryptosporidium</i> est le micro-organisme le plus résistant à la désinfection. Mais il ne pose pas de problème majeur étant donné qu'il s'élimine facilement par décantation dans les phase primaire du traitement.</p>

Évaluation du risque de contamination virale lié à la réutilisation des eaux usées épurées

Asano 1990	<p>Objectif : évaluer les risques potentiels d'infection associés à différents usages d'eaux usées traitées.</p> <p>Résultats : Le risque d'infection varie de 2 unités logarithmiques en fonction du type d'exposition : lieu de baignade alimenté par des eaux usées traitées et golf irrigué avec des eaux usées traitées.</p>
Asano 1992	<p>Objectifs Évaluer les critères de valorisation d'eaux usées en Californie en utilisant les données d'un suivi sur les virus entériques</p> <p>Résultats : les analyses montrent que le risque annuel d'infection lié à l'utilisation d'un effluent tertiaire dont la concentration virale est de 1 unité pour 100 L, varie en fonction de l'exposition :</p> <p>activités récréatives (natation, golfs) : 10^{-2} à 10^{-7}, irrigation de cultures ou recharge souterraine : 10^{-6} à 10^{-11}</p>
Asano 1998	<p>Objectif : évaluer les risques potentiels associés à l'utilisation des eaux usées épurées dans différentes applications, en utilisant 4 scénarios d'exposition : irrigation de terrain de golf, irrigation de cultures destinées à l'alimentation, eaux de baignade et recharge des eaux souterraines</p> <p>Résultat : si le risque d'infection annuel est inférieur ou égal à 10^{-4} pour déterminer la fiabilité de la valorisation et de la réutilisation des eaux, les pratiques de réutilisation des eaux usées épurées sont aussi saines que l'usage de ressources d'eaux domestiques.</p>
Shuval 1997	<p>Objectif : développer une approche d'évaluation des risques pour effectuer une analyse comparative de différentes réglementations sanitaires microbiologiques recommandées pour l'irrigation de légumes consommables crus avec des eaux usées traitées (USEPA et OMS).</p> <p>Résultats : le risque d'hépatite A est de $6,6 \cdot 10^{-2}$ en mangeant 100 g de salade pendant 150 jours, irriguée avec des eaux usées brutes avec une dose infectante de 30 ufp. Le risque d'infection en mangeant 100 g de salade pendant 150 jours, irriguée avec des eaux usées traitées respectant les normes de l'OMS est de $6,9 \cdot 10^{-6}$.</p>

Effets sanitaires chez les travailleurs agricoles en contact direct avec les eaux usées traitées utilisées pour l'irrigation

Krishnamoorthi et coll. (1973) Inde	Infections parasitaires intestinales chez des travailleurs agricoles Le taux d'infection parasitaire intestinale (<i>Ankylostoma duodénale</i> et ascaris) est plus élevé ($p \geq 0,01$) chez des travailleurs agricoles exposés (87 %) que dans un groupe de contrôle, non exposé (50 %).												
Sinneker (1958) Allemagne	Signification épidémiologique des égouts urbains dans la diffusion possible d'infections zooparasitaires Sinneker a déterminé des taux d'infections parasitaires parmi des employés de stations d'épurations (1) et chez des travailleurs agricoles (2) <table border="1" data-bbox="475 981 1364 1205"> <thead> <tr> <th></th> <th>(1)</th> <th>(2)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>Entameba histolytica</i></td> <td>4 %</td> <td>9 %</td> </tr> <tr> <td>Ascaris</td> <td>2 %</td> <td>16 %</td> </tr> <tr> <td><i>Trichuris trichuria</i></td> <td>5 %</td> <td>11 %</td> </tr> </tbody> </table>		(1)	(2)	<i>Entameba histolytica</i>	4 %	9 %	Ascaris	2 %	16 %	<i>Trichuris trichuria</i>	5 %	11 %
	(1)	(2)											
<i>Entameba histolytica</i>	4 %	9 %											
Ascaris	2 %	16 %											
<i>Trichuris trichuria</i>	5 %	11 %											
Faechem et coll. (1983) Allemagne	Faechem et coll. ont déterminé des taux d'infection parmi 3 types de travailleurs : égoutiers (3 %), employés de stations d'épuration (16 %), travailleurs agricoles (30 %).												
Clark et coll. (1981) États-Unis, Cincinnati (Ohio), Chicago (Illinois), Memphis (Tennessee)	Risques sanitaires de l'exposition humaine aux eaux usées dans trois villes des États-Unis (Cincinnati, Chicago, Memphis) Il s'agit d'une étude prospective séroépidémiologique auprès de travailleurs de stations d'épuration. Les principaux résultats sont les suivants : les taux de gastro-entérites sont plus élevés chez les nouveaux travailleurs que chez les anciens et le groupe de contrôle, pas de différences entre les taux d'immunoglobuline chez les travailleurs et chez les personnes du groupe de contrôle, absence de contamination des familles, pour certains virus, le niveau d'anticorps est représentatif de l'exposition aux aérosols d'eaux résiduaires, le taux de bactéries est élevé dans les aérosols, absence d'effet significatif parmi les travailleurs												

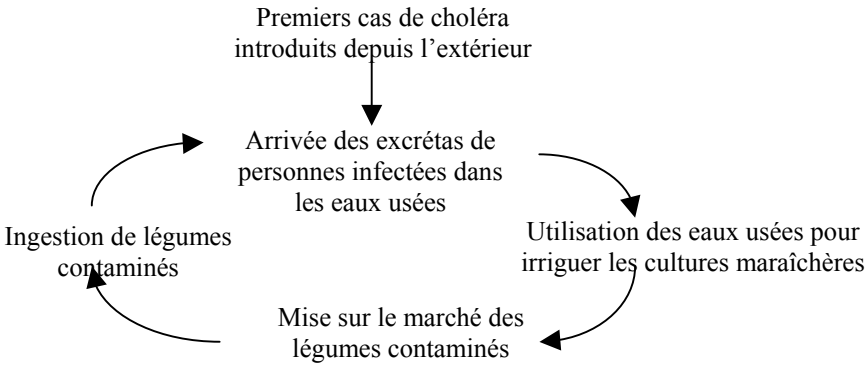
<p>Clark et coll. (1981) Linneman et coll. (1984) Etats-Unis, Maskegon (Michigan)</p>	<p>Évaluation des risques sanitaires associés au traitement et à l'évacuation des eaux usées urbaines</p> <p>Les auteurs ont étudié l'exposition professionnelle des travailleurs d'égout à différents agents (produits chimiques organiques, champignons, endotoxines) et les effets sanitaires sur les travailleurs exposés à l'irrigation par aspersion d'eaux usées.</p> <p>Les résultats obtenus sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> absence de détection de virus dans l'air, disparition des virus au cours de la filière de traitement, mise en évidence de virus dans les eaux brutes par la méthodes de centrifugation/filtration présence 0 à 9 coliphage / m³ dans l'air, absence de différence significative des taux de maladie et d'isolation de virus entre les travailleurs exposés et les travailleurs non exposés, taux d'anticorps aux virus coxsackies B-5 plus élevés chez les travailleurs en contact direct avec l'eau que chez les autres travailleurs absence d'augmentation de la prévalence des anticorps de l'hépatite A chez les personnes exposées à l'irrigation absence de différence des taux d'anticorps aux Poliovirus 1, 2 et 3, Coxsackies B-2 et Echo-7 et 11 entre les deux groupes de travailleurs, quantités de bactéries dans l'air, plus importante dans la direction du vent (particulièrement pour <i>klebsiella</i>) que dans la direction inverse
<p>Fattal, Yekutiël, Shuval (1984) Israël, Jérusalem</p>	<p>Épidémie de choléra</p> <p>Le taux d'examens sérologiques positifs est de 57 % chez les travailleurs agricoles, alors qu'il est de 8 % dans la population générale.</p>

Effets sanitaires dans les populations environnantes exposées aux eaux usées traitées utilisées pour l'irrigation

Rivera Ramirez (1980) Mexique	<p>Utilisation d'eaux usées pour l'irrigation à Tula, dans l'état d'Hidalgo, au Mexique</p> <p>L'objectif de l'étude est de comparer l'incidence de pathologies gastro-entériques dans deux communautés agricoles, l'une utilisant des eaux usées non traitées, l'autre irriguant avec de l'eau non contaminée.</p> <p>Le risque d'exposition à l'amibiase est plus élevé dans la zone d'irrigation utilisant des eaux usées.</p>
Sanchez Leyva (1976) Mexique	<p>L'utilisation d'eau usées pour l'irrigation et ses impacts sur la santé humaine à Mexico</p> <p>Les auteurs étudient les infections gastro-entériques causées par des protozoaires et des helminthes chez les scolaires.</p> <p>La méthode utilisée consiste à comparer un groupe exposé, situé dans une zone irriguée avec des eaux usées et un groupe non exposé situé dans une zone contrôle. La prévalence des maladies n'a augmenté dans aucun des deux groupes.</p>
Fannin et coll. (1980) Etats-Unis, Tecumseh (Michigan)	<p>Différence de maladies aiguës en fonction de la distance depuis la station d'épuration de Tecumseh, dans le Michigan</p> <p>Les déclarations de maladies aiguës, dans une population résidant à proximité d'une station d'épuration, ont été comparées en fonction de la distance à la station d'épuration.</p> <p>L'incidence des pathologies respiratoires et gastro-entériques augmente lorsqu'on se rapproche de la station d'épuration (de 2400 m à 600 m).</p>
Johnson et coll. (1980) Etats-Unis, Schaumburg (Illinois)	<p>Effets sanitaires dus aux aérosols d'eaux résiduaires produits par une nouvelle station d'épuration à boues activées</p> <p>Une incidence élevée de symptômes gastro-intestinaux et de maladies de peau associées aux aérosols a été constatée. D'après l'auteur les témoignages sont insuffisants pour associer ou non ces effets à l'exposition aux aérosols.</p>
Camann (1980) Etats-Unis, Tigard (Orégon)	<p>Aérosols d'eaux résiduaires et suivi des absences à l'école à proximité d'une installation de traitement d'eaux résiduaires</p> <p>Il s'agit d'une étude avant – après d'élèves exposés à des aérosols provenant de la station d'épuration de l'école.</p> <p>Les auteurs n'ont pas mis en évidence d'effets indésirables dus aux aérosols sur l'incidence des maladies transmissibles, celles-ci étant mesurées par l'absentéisme.</p>
Camann et coll. (1983) Lubbock (Texas)	<p>Une évaluation des effets sanitaires infectieux potentiels à partir d'aspersion d'eaux résiduaires sur des terres</p> <p>Les auteurs ont observé la présence de micro-organismes jusqu'à 400 m dans la direction du vent. Ils n'ont pas mis en évidence de relation entre les effets sanitaires et l'exposition.</p>

Katzenelson, Buim, Shuval (1976) Israël	Risque de pathologies infectieuses transmissibles associées à l'irrigation avec des eaux usées dans des exploitation agricoles en Israël L'incidence de pathologies infectieuses (salmonellose, shigellose, fièvre typhoïde, hépatite) est 2 à 4 fois plus élevée dans la zone d'habitation située à 1000 m du secteur irrigué (aéroaspersion) que dans la zone témoin.
Katzenelson et coll. (1976) Fattal et coll. (1981) Suval et coll. (1983) Israël	Risques sanitaires associés à l'utilisation d'eaux usées dans les exploitations agricoles en Israël : une étude épidémiologique historique Les auteurs ont utilisé des données de morbidité dans 78 kibboutz répartis en 4 catégories, sur une période de 4 ans. Aucune différence significative n'a été observé dans les taux de salmonelloses, hépatites ou fièvre typhoïde entre les kibboutz irrigués et ceux non irrigués.
Shuval et coll. (1989) Israël	Transmission de maladies entériques liées à l'irrigation avec des eaux usées : un étude épidémiologique prospective L'étude s'est déroulée dans 20 kibboutz en Israël entre mars 1981 et février 1982. Des données médicales ont été collectées à partir des fichiers des patients et des enregistrements quotidiens chez les médecins et les infirmières de chaque clinique de kibboutz. Les épisodes de maladies entériques étaient similaires dans les kibboutz les plus exposés aux aérosols d'eaux résiduaires (11,6 % personnes-jours) à ceux non exposés (11,0 % personnes-jours). Aucun excès de maladie entérique n'a été constaté parmi les travailleurs ou leur famille en contact avec les eaux usées, en comparaison avec les non-exposés.
Blumental et coll. (1995) Mexique	Évaluation des recommandations de l'OMS sur les œufs d'helminthes pour l'irrigation contrôlée ou non Des études épidémiologiques ont été menées à Mexico pour évaluer les effets sur les travailleurs agricoles de l'irrigation contrôlée avec des eaux usées brutes et avec des eaux partiellement traitées. Des études microbiologiques ont été effectuées au Brésil et à Leeds pour évaluer la contamination des plantes avec des œufs d' <i>Ascaris lumbricoïdes</i> et <i>Ascaridia galli</i> viables, après irrigation avec des eaux usées traitées de différentes qualités. Les résultats indiquent que les recommandations de l'OMS de moins de 1 œuf par litre protègent les consommateurs de végétaux, mais pas nécessairement les travailleurs agricoles et leurs familles, en particulier leurs enfants.
Bouhoum (1995) Maroc, Marrakech	Étude épidémiologique des infections à helminthes dans la zone irriguée avec des eaux usées brutes à Marrakech L'objectif de l'étude est de déterminer si les infections parasitaires se produisent plus fréquemment parmi les enfants exposés aux eaux usées que parmi ceux du groupe contrôle. Les enfants de la zone exposée présentent plus d'ascaris (73 % contre 30 %) et de trichures que les autres, mais autant d'oxyures, ténias et <i>Hymenolepis</i> . Le polyparasitisme concerne surtout les jeunes enfants.

Effets sanitaires en population générale dus à la consommation de produits irrigués avec des eaux usées brutes

<p>Khalid (1931) Egypte, Tara</p>	<p>Ascaridiose et Trichocéphalose parmi les résidents de la prison de Tara en Égypte L'incidence de bilharziose et d'ankylostomose est moins élevée chez les prisonniers qu'en population paysanne et le taux d'infection chez les prisonniers diminue avec le temps passé en prison Des incidences élevées d'ascaridiose (80 %) et de trichocéphalose ont été observées chez les prisonniers. Ces infections ont été transmises par des légumes irrigués avec des eaux usées.</p>
<p>Baumhogger (1949) Allemagne, Darmstadt</p>	<p>Ascaridiose à Darmstadt, en Allemagne L'incidence d'ascaridiose dans la population de Darmstadt est de 40 à 50 %.</p>
<p>Ben-Ari (1962), Jjumba-Mukabu et coll. (1971), Suval et coll. (1984) Israël, Jérusalem</p>	<p>Transmission de d'helminthes par des végétaux irrigués avec des eaux usées à Jérusalem Relation entre les échantillons positifs de selles d'Ascaris dans la population à l'ouest de Jérusalem et l'approvisionnement en végétaux irrigués avec des eaux usées brutes.</p>
<p>Gerichter et coll. (1971), Fatta et coll. (1984) Israël, Jérusalem</p>	<p>Épidémie de choléra à Jérusalem en 1970 : le cas de transmission à partir de légumes irrigués avec des eaux usées brutes 176 cas de choléra sont apparus d'août à octobre 1970 à Jérusalem.</p>  <p>Cycle hypothétique de la transmission de <i>Vibrio cholerae</i>. Source : Shuval, 1996.</p>
<p>Shuval (1993) Chili, Santiago</p>	<p>Investigation au sujet de la transmission de la fièvre typhoïde et du choléra par l'irrigation à partir d'eaux usées à Santiago au Chili Des taux de fièvre typhoïde élevés ont été observés à Santiago du Chili avec des pics de 210 cas / 100 000 en 1977 et 1982. Le pic de fièvre typhoïde observé à Santiago en été correspond au pic de la saison d'irrigation et de la récolte des végétaux irrigués avec les eaux résiduaires. En avril 1991, une épidémie de 41 cas de choléra est survenue au Chili, due probablement à des cas provenant du Pérou. 68 % des cas de choléra ont consommé des salades irriguées avec des eaux usées.</p>

Extrait de Crook, 1999.

Site de l'étude	Qualité des eaux usées étudiées	Type d'étude	Principales conclusions
Windhoek, Namibie	Effluent issu d'une usine de traitement de haute qualité (traitement secondaire, addition d'aluminium, flottation sur air dissous, chloration, traitement à la chaux, filtration sur sable, chloration, CAG* et chloration finale)	Toxicologique (<i>in vivo</i> et à court terme) et épidémiologique	Aucune corrélation n'a été observée entre la consommation d'eau potable et l'incidence des diarrhées
Comté de Los Angeles, Californie	Eau puisée dans un aquifère rechargé par épandage avec de l'eau épurée (traitement secondaire, filtration et chloration-déchloration)	Toxicologique (<i>in vitro</i>) et épidémiologique	Aucune corrélation n'a été observée entre le pourcentage d'eau épurée dans les puits et les mutations observées dans les tests toxicologiques. Dans l'étude épidémiologique, les populations ingérant de l'eau épurée ont montré qu'aucun effet néfaste sur la santé n'a été mesuré.
Washington, D.C.	Effluent issu de l'usine de traitement de l'estuaire du Potomac (traitement secondaire, aération, coagulation, floculation, sédimentation, pré-désinfection, filtration, CAG et post-désinfection)	Toxicologique (<i>in vitro</i>)	Aucune différence significative n'a été observée entre les propriétés toxicologiques de l'eau épurée et de l'eau provenant de trois usines de traitement conventionnelles
Denver, Colorado	Effluent issu d'une usine de traitement avancée de démonstration (traitement secondaire, traitement à la chaux, recarbonation, filtration, échange d'ions sélectif, CAG, ozonation, osmose inverse, flux d'air et chloration)	Toxicologique (<i>in vitro</i> et <i>in vivo</i>)	Aucun effet relatif au traitement n'a été observé dans les tests toxicologiques utilisant des concentrations élevées de résidus organiques, dans les études <i>in vivo</i> .
San Diego, Californie	Effluent issu d'une usine de traitement pilote (traitement secondaire, coagulation, filtration, désinfection UV, osmose inverse, flux d'air et CAG)	Toxicologique (<i>in vitro</i> et <i>n vivo à court terme</i>)	L'eau épurée a montré moins d'activité mutagènes que l'eau provenant de source conventionnelle
Tampa, Floride	Effluent issu d'une usine de traitement pilote (traitement secondaire, filtration, dénitrification, traitement à la chaux, recarbonation, filtration, CAG et ozonation)	Toxicologique (<i>in vitro</i> et <i>in vivo</i>)	Tous les tests toxicologiques ont été négatifs sauf pour une toxicité fœtale mise en évidence chez des rats (mais pas les souris) pour des échantillons de l'usine de traitement

*CAG = charbon actif en grain

Annexe 9

USEPA guidelines

Suggested Guidelines for Water Reuse

Type of Reuse	Treatment	Reclaimed Water Quality	Reclaimed water Monitoring	Setback Distances	Comments
<p><i>Urban Reuse</i></p> <p>All types of landscape irrigation, (e.g., golf courses, parks, cemeteries) – also vehicle washing, toilet flushing, use in fire protection systems and commercial air conditioners, and other uses with similar access or exposure to the water</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Filtration⁵ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6-9 ▪ ≤ 10 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 2 NTU⁸ ▪ No detectable fecal coli/100 ml^{9,10} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ BOD weekly ▪ Turbidity – continuous ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 50 ft (15m) to potable water supply wells 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ See Table 2-7 for other recommended limits ▪ At controlled-access irrigation sites where design and operational measures significantly reduce the potential of public contact with reclaimed water, a lower level of treatment, n e.g., secondary treatment and disinfection to achieve < 14 fecal coli/100 ml, may be appropriate. ▪ Chemical (coagulant and/or polymer) addition prior to filtration may be necessary to meet water quality recommendations. ▪ The reclaimed water should not contain measurable levels of viable pathogens.¹² ▪ Reclaimed water should be clear and odourless. ▪ A higher chlorine residual and/or a longer contact time may be necessary to assure that viruses and parasites are inactivated or destroyed. ▪ A chlorine residual of 0.5 mg/l or greater in the distribution system is recommended to reduce odors, slimes, and bacterial regrowth. ▪ See Section 3.4.3. for recommended treatment reliability.
<p><i>Restricted access Area Irrigation</i></p> <p>Sod farms, silviculture sites, and other areas where public access is prohibited, restricted or infrequent</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6-9 ▪ ≤ 30 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 30 mg/l TSS ▪ ≤ 200 fecal coli/100 ml^{9,13,14} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ BOD weekly ▪ TSS – daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 300 ft (90m) to potable water supply wells ▪ 100 ft (30m) to areas accessible to the public (if spray irrigation) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ See Table 2-7 for other recommended limits ▪ If spray irrigation, TSS less than 30 mg/l may be necessary to avoid clogging of sprinkler heads. ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
<p><i>Agricultural reuse – Food Crops Not Commercially Processed¹⁵</i></p> <p>Surface or spray irrigation of any food crop, including crops eaten raw.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6-9 ▪ ≤ 10 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 2 NTU⁸ ▪ No detectable fecal coli/100 ml^{9,10} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ BOD weekly ▪ Turbidity – continuous ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 50 ft (15m) to potable water supply wells 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ See Table 2-7 for other recommended limits ▪ Chemical (coagulant and/or polymer) addition prior to filtration may be necessary to meet water quality recommendations. ▪ The reclaimed water should not contain measurable levels of viable pathogens.¹² ▪ A higher chlorine residual and/or a longer contact time may be necessary to assure that viruses and parasites are inactivated or destroyed. ▪ High nutrient levels may adversely affect some crops during certain growth stages ▪ See Section 3.4.3. for recommended treatment reliability.

Type of Reuse	Treatment	Reclaimed Water Quality	Reclaimed water Monitoring	Setback Distances	Comments
<p><i>Agricultural reuse – Food Crops Commercially Processed</i>¹⁵</p> <p>Surface irrigation of Orchards and vineyards.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6-9 ▪ ≤ 30 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 30 mg/l TSS ▪ ≤200 fecal coli/100 ml^{9,13,14} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ BOD weekly ▪ TSS – daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 300 ft (90m) to potable water supply wells ▪ 100 ft (30m) to areas accessible to the public (if spray irrigation) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ See Table 2-7 for other recommended limits ▪ If spray irrigation, TSS less than 30 mg/l may be necessary to avoid clogging of sprinkler heads. ▪ High nutrient levels may adversely affect some crops during certain growth stages ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
<p><i>Agricultural reuse – non Food Crops</i></p> <p>Pasture for milking animals; fodder, fiber, and seed crops</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6-9 ▪ ≤ 30 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 30 mg/l TSS ▪ ≤200 fecal coli/100 ml^{9,13,14} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ BOD weekly ▪ TSS – daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 300 ft (90m) to potable water supply wells ▪ 100 ft (30m) to areas accessible to the public (if spray irrigation) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ See Table 2-7 for other recommended limits ▪ If spray irrigation, TSS less than 30 mg/l may be necessary to avoid clogging of sprinkler heads. ▪ High nutrient levels may adversely affect some crops during certain growth stages. ▪ Milking animals should be prohibited from grazing for 15 days after irrigation ceases. A higher level of disinfection, e.g., to achieve ≤ 14 fecal coli/100 ml, should be provided if this waiting period is not adhered to. ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
<p><i>Recreational Impoundments</i></p> <p>Incidental contact (e.g., fishing and boating) and full body contact with reclaimed water allowed</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Filtration⁵ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH = 6-9 ▪ ≤ 10 mg/l BOD⁷ ▪ ≤2 NTU⁸ ▪ No detectable fecal coli/100 ml^{9,10} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ BOD weekly ▪ Turbidity – continuous ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 500 ft (150m) to potable water supply wells (minimum) if bottom not sealed 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dechlorination may be necessary to protect aquatic species of flora and fauna ▪ Reclaimed water should be non-irritating to skin and eyes\$ ▪ Reclaimed water should be clear and odourless. ▪ Nutrient removal may be necessary to avoid algae growth in impoundments ▪ Chemical (coagulant and/or polymer) addition prior to filtration may be necessary to meet water quality recommendations. ▪ The reclaimed water should not contain measurable levels of viable pathogens.^{12*} ▪ A higher chlorine residual and/or a longer contact time may be necessary to assure that viruses and parasites are inactivated or destroyed. ▪ Fish caught in impoundments can be consumed. ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
<p><i>Landscape Impoundments</i></p> <p>Aesthetic impoundment where public contact with reclaimed water is not allowed</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ≤ 30 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 30 mg/l TSS ▪ ≤200 fecal coli/100 ml^{9,13,14} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ TSS – daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 500 ft (150m) to potable water supply wells (minimum) if bottom not sealed 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutrient removal may be necessary to avoid algae growth in impoundments ▪ Dechlorination may be necessary to protect aquatic species of flora and fauna ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.

Type of Reuse	Treatment	Reclaimed Water Quality	Reclaimed water Monitoring	Setback Distances	Comments
<i>Construction Use</i> Soil compaction, dust control, washing aggregate, making concrete	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ≤ 30 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 30 mg/l TSS ▪ ≤200 fecal coli/100 ml_{9,13,14} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BOD weekly ▪ TSS – daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Worker contact with reclaimed water should be minimized ▪ A higher level of disinfection , e.g., to achieve ≤ 14 fecal coli/100 ml, should be provided when frequent work contact with reclaimed water is likely ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
<i>Industrial Reuse</i> Once-through cooling	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ≤ 30 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 30 mg/l TSS ▪ ≤200 fecal coli/100 ml_{9,13,14} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ BOD weekly ▪ TSS – daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 300 ft (90m) to areas accessible to the public 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Windblown spray should not reach areas accessible to workers or the public
Recirculating cooling towers	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ (chemical coagulation and filtration may be needed) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variable depends on recirculation ratio (see Section 2.2.1) pH = 6-9 ▪ ≤ 30 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 30 mg/l TSS ▪ ≤200 fecal coli/100 ml_{9,13,14} ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum)¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - weekly ▪ BOD weekly ▪ TSS – daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 300 ft (90m) to areas accessible to the public. May be reduced or eliminated if high level of disinfection is provided 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Windblown spray should not reach areas accessible to workers or the public ▪ Additional treatments by user is usually provided to prevent scaling, corrosion, biological growths, fouling and foaming. ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
Other Industrial Uses	Depends on site specific uses (See Section 2.2.3)				
<i>Environmental Reuse</i> Wetlands, marshes, wildlife habitat, stream augmentation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variable ▪ Secondary⁴ and disinfection⁶ (minimum) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variable, but not to exceed: <ul style="list-style-type: none"> ▪ ≤ 30 mg/l BOD⁷ ▪ ≤ 30 mg/l TSS ▪ ≤200 fecal coli/100 ml_{9,13,14} 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BOD weekly ▪ TSS – daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dechlorination may be necessary to protect aquatic species of flora and fauna ▪ Possible effects on groundwater should be evaluated ▪ Receiving water quality requirements may necessitate additional treatment ▪ The temperature of the reclaimed water should not adversely affect ecosystem ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
<i>Groundwater Recharge</i> By spreading or injection into aquifers not used for public water supply	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site-specific and use dependent ▪ Primary (minimum) for spreading ▪ Secondary⁴ (minimum) for injection 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site-specific and use dependent 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Depends on treatment and use 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site-specific 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Facility should be designed to ensure that no reclaimed water reaches potable water supply aquifers ▪ See section 2.5 for more information ▪ For spreading projects, secondary treatment may be needed to prevent clogging ▪ For injection projects, filtration and disinfection may be needed to prevent clogging ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.

Type of Reuse	Treatment	Reclaimed Water Quality	Reclaimed water Monitoring	Setback Distances	Comments
<p><i>Indirect Potable Reuse</i></p> <p>Groundwater recharge by spreading into potable aquifers</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ ▪ May also need Filtration⁵ <p>And/or advanced wastewater treatment¹⁶</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Disinfection⁶ ▪ Meet drinking water standards after percolation through vadose zone 	<p>Includes, but not limited to, the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ pH - daily ▪ Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous ▪ Drinking water standards quarterly ▪ Other¹⁷ – depends on constituent ▪ BOD weekly ▪ Turbidity – continuous 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 500 ft (150 m) to extraction wells. May vary depending on treatment provided and site-specific conditions 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ The depth to groundwater (i.e., thickness to the vadose zone) should be at least 6 feet (2 m) at the maximum groundwater mounding point. ▪ The reclaimed water should be retained underground for at least 6 months prior to withdrawal ▪ Recommended treatment is site-specific and depends on factors such as type of soil, percolation rate, thickness of vadose zone, native groundwater quality, and dilution. ▪ Monitoring wells are necessary to detect the influence of the recharge operation on the groundwater ▪ See section 2.5 and 2.6 for more information ▪ The reclaimed water should not contain measurable levels of viable pathogens after percolation through the vadose zone.¹² ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
<p><i>Indirect Potable Reuse</i></p> <p>Groundwater recharge by injection into potable aquifers</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Filtration⁵ ▪ Disinfection⁶ ▪ advanced wastewater treatment¹⁶ 	<p>Includes, but not limited to, the following :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ PH=6.5 – 8.5 ▪ ≤ 2 NTU 8 ▪ No detectable total coli/100 ml 9,10 ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum) 11 ▪ ≤ 3 mg/l TOC ▪ ≤ 0.2 mg/l TOX ▪ Meet drinking water standards 	<p>Includes, but not limited to, the following :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ pH – daily ▪ Turbidity – continuous ▪ Total Coliform – daily ▪ CL₂ residual – continuous ▪ Drinking water standards quarterly ▪ Other¹⁷ – depends on constituent 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 000 ft (600 m) to extraction wells. May vary depending on treatment provided and site-specific conditions 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ The reclaimed water should be retained underground for at least 9 months prior to withdrawal ▪ Monitoring wells are necessary to detect the influence of the recharge operation on the groundwater ▪ Recommended quality limits should be met at the point of injection ▪ The reclaimed water should not contain measurable levels of viable pathogens after percolation through the vadose zone.¹² ▪ A higher chlorine residual and/or a longer contact time may be necessary to assure that virus and protozoa inactivation. ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.
<p><i>Indirect Potable Reuse</i></p> <p>Augmentation of surface supplies</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secondary⁴ ▪ Filtration⁵ ▪ Disinfection⁶ ▪ advanced wastewater treatment¹⁶ 	<p>Includes, but not limited to, the following :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ PH=6.5 – 8.5 ▪ ≤ 2 NTU 8 ▪ No detectable total coli/100 ml 9,10 ▪ 1 mg/l CL₂ residual (minimum) 11 ▪ ≤ 3 mg/l TOC ▪ Meet drinking water standards 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site-specific 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recommended level of treatment is site-specific and depends on factors such as receiving water quality, time and distance to point of withdrawal, dilution and subsequent treatment prior to distribution for potable uses ▪ The reclaimed water should not contain measurable levels of viable pathogens.¹² ▪ See section 2.6 for more information ▪ A higher chlorine residual and/or a longer contact time may be necessary to assure that virus and protozoa inactivation. ▪ See Section 3.4.3 for recommended treatment reliability.

Footnotes

1. These guidelines are based on water reclamation and reuse practices in the U.S., and they are especially directed at states that have not developed their own regulations or guidelines. While the guidelines should be useful in many areas outside the U.S., local conditions may limit the applicability of the guidelines in some countries (see chapter 8). It is explicitly stated that the direct application of these suggested guidelines will not be used by USAID as strict criteria for funding.
2. Unless otherwise noted, recommended quality limits apply to the reclaimed water at the point of discharge from the treatment facility.
3. Setback distances are recommended to protect potable water supply sources from contamination and to protect humans from unreasonable health risks due to exposure to reclaimed water.
4. Secondary treatment processes include activated sludge processes, trickling filters, rotating biological contractors, and may include stabilization pond systems. Secondary treatment should produce effluent in which both the BOD and TSS do not exceed 30 mg/l.
5. Filtration means the passing of wastewater through natural undisturbed soils or filter media such as sand and/or anthracite, filter cloth, or the passing of wastewater through microfilters or other membrane processes.
6. Disinfection means the destruction, inactivation, or removal of pathogenic microorganisms by chemical, physical, or biological means. Disinfection may be accomplished by chlorination, UV radiation, ozonation, other chemical disinfectants, membrane processes, or other processes. The use of chlorine as defining the level of disinfection does not preclude the uses of other disinfection processes as an acceptable means of providing disinfection for reclaimed water.
7. As determined from the 5-day BOD test.
8. The recommended turbidity limit should be met prior to disinfection. The average turbidity should be based on a 24-hour time period. The turbidity should not exceed 5 NTU at any time. If TSS is used in lieu of turbidity, the TSS should not exceed 5 mg/l.
9. Unless otherwise noted, recommended coliform limits are median values determined from the bacteriological results of the last 7 days for which analyses have been completed. Either the membrane filter or fermentation-tube technique may be used.
10. The number of fecal coliform organisms should not exceed 14/100 ml in any sample.
11. Total chlorine residual should be met after a minimum contact time of 30 minutes.
12. It is advisable to fully characterize the microbiological quality of the reclaimed water prior to implementation of a reuse program.
13. The number of fecal coliform organisms should not exceed 800/100 ml in any sample.
14. Some stabilization pond systems may be able to meet this coliform limit without disinfection.
15. Commercially processed food crops are those that, prior to sale to the public or others, have undergone chemical or physical processing sufficient to destroy pathogens.
16. Advanced wastewater treatment processes include chemical clarification, carbon adsorption, reverse osmosis and other membrane processes, air stripping, ultrafiltration, and ion exchange.
17. Monitoring should include inorganic and organic compounds, or classes of compounds, that are known or suspected to be toxic, carcinogenic, teratogenic, or mutagenic and are not included in the drinking water standards.

