

Gérard Monchalin avait préparé à son départ en retraite en juillet 1999 une note très détaillée récapitulant ses expériences et la documentation qu'il avait rassemblée sur le thème de la réutilisation des eaux usées, particulièrement importante dans différents pays où il avait été en séjour ou en mission.

Cette note a été reprise et complétée par Jacques AVIRON-VIOLET avec les nombreux éléments présentés lors du " 1st World Water Congress of the International Water Association (IWA) ", tenu à Paris du 3 au 7 juillet 2000 entre autres sur le thème spécifique Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse (Eaux usées, Restauration, Recyclage et Réutilisation)

S O M M A I R E

RÉUTILISATION DES EAUX USÉES APRÈS TRAITEMENT

1 - Réutilisation des eaux usées.....	4
1.1 Situation de l'utilisation des eaux usées	4
1.1.1. Différentes utilisations des eaux usées.....	4
1.1.2. Les quantités utilisées dans le monde, notamment le Maghreb.....	5
1.2 Composition des eaux usées.....	6
1.3 Historique de l'utilisation des eaux usées.....	7
1.4 Perspectives de l'utilisation des eaux usées.....	8
1.4.1 Plans directeurs d'utilisation des eaux usées traitées.....	8
1.4.2 Réutilisation des eaux usées à la source.....	8
2 - Contraintes de qualité des eaux.....	9
2.1 France	10
2.2 Autres pays.....	11
3 Procédés d'épuration et d'affinage	15
3.1 Compléments sur les procédés conventionnels	16
3.1.1. Coagulation – floculation - clarification	16
3.1.2. Traitements biologiques secondaires.....	16
3.1.3. Procédés à membranes.....	18
3.2 Elimination des microorganismes.....	19
3.2.1. Elimination par les techniques membranaires.....	20
3.2.2. Désinfection.....	21
3.2.4. Traitements tertiaires.....	24
3.3 Procédés extensifs.....	24
3.3.1. Infiltration - percolation	24
3.3.2. Lagunage naturel.....	26
3.3.2. Marais artificiels	28
3.4 Stockage.....	29
3.4.1. Recharge de nappes aquifères.....	29
3.4.2. Réservoirs de stabilisation.....	29
4 Exemples d'applications.....	30
4.1 Application à la production d'eau potable.....	30
4.2 Application à l'irrigation.....	31
4.3 Application à la production d'eau industrielle.....	32
4.4 Données économiques.....	32
4.4.1. Coûts d'investissement et prix de la réutilisation de l'eau.....	32

4.4.2. Solutions alternatives.....	34
Conclusions.....	34
Annexe Utilisation des membranes.....	36
Bibliographie.....	37

RÉUTILISATION DES EAUX USÉES APRÈS TRAITEMENT

1 - Réutilisation des eaux usées

Après utilisation, les eaux potables, devenues eaux usées, sont éliminées par une des filières suivantes :

- rejet direct dans le milieu naturel quand le pouvoir auto épurateur de celui-ci est suffisant,
- traitement en station d'épuration et rejet dans le milieu naturel,
- traitement en station d'épuration et réutilisation pour divers usages :
 - soit directement, après traitement, généralement tertiaire,
 - soit indirectement, après passage par les milieux naturels qui apporte souvent un complément d'épuration (recharge de nappes, stockage dans des réservoirs artificiels ou des lacs, rejets en rivière avec transport jusqu'au point d'utilisation),
- épandage, éventuellement après traitement ou prétraitement, pour l'évacuation et l'épuration par le sol.

L'objet de la présente note est d'examiner les filières du troisième type et plus particulièrement le cas de l'utilisation pour l'irrigation et les usages urbains. Les eaux usées sont peu récupérées en France où l'on dispose généralement de ressources naturelles suffisantes. Leur utilisation se justifie habituellement plus par le souhait de ne pas rejeter dans un milieu particulièrement sensible. Mais il n'en est pas de même dans des pays voisins, notamment du sud de la Méditerranée (par exemple Egypte, Israël, Tunisie), qui veulent disposer de ressources plus importantes pour l'irrigation et ne pas utiliser à cette fin les rares ressources d'eau de qualité provenant des nappes.

1.1 Situation de l'utilisation des eaux usées

1.1.1. Différentes utilisations des eaux usées

En France et dans les pays proches les principales utilisations sont les suivantes :

- utilisations urbaines : arrosage des espaces verts, lavage des rues, alimentation de plans d'eau, fontaines, auxquelles on peut ajouter une utilisation périurbaine qui se développe : arrosage des golfs,
- utilisations agricoles : irrigation,
- utilisations industrielles : cette réutilisation est importante en raison du recyclage fréquent des eaux de process qui est souvent justifié par la réduction des consommations mais aussi par la récupération des sous-produits. Mais elle peut aussi concerner les eaux de refroidissement. La réutilisation est plus difficile à envisager pour des eaux de chaudière qui doivent être fortement déminéralisées et pour les eaux des industries agroalimentaires qui doivent avoir la qualité des eaux potables,
- amélioration des ressources et de la qualité des eaux : recharge des nappes, protection contre l'intrusion du biseau salé en bord de mer par recharge de nappes.

Il conviendrait d'ajouter à ces usages d'autres utilisations qui sont moins fréquentes et souvent spécifiques à certains pays :

- utilisations urbaines :
 - production d'eau potable (un seul exemple d'utilisation directe : Windhoek en Namibie, de très nombreux exemples de recharge de nappes en particulier aux USA)
 - recyclage des eaux grises¹ généralement au niveau d'immeubles de bureaux ou d'habitations collectives pour l'alimentation des toilettes (généralisé au Japon, un exemple particulier à Londres : le Millénium et un exemple exceptionnel² en France dans un immeuble de 65 logements à Annecy)
 - l'échange de chaleur pour la climatisation des locaux ou la fusion des neiges (Japon).
 - lutte contre l'incendie (Val d'Aoste)
- utilisations agricoles
 - irrigation hydroponique (Singapour)
- utilisations industrielles
 - eau de refroidissement pour des aciéries et eau de process pour des industries textiles (Toscane).

1.1.2. Les quantités utilisées dans le monde, notamment le Maghreb

Les quantités réutilisées sont importantes dans les pays qui disposent de ressources limitées qui sont insuffisantes ou risquent de le devenir.

Pays	Taux d'exploitation de ses ressources	Volume recyclé	Augmentation du volume recyclé
Egypte	97%,	?	Multiplication par 10 en 2025
Israël	86%,	25% des besoins en 2000	Majeure partie (400 M m ³) en 2010
Tunisie	78%	10% des besoins en 2000	
Jordanie	?	?	Multiplication par 3 à 4 en 2010
Pays du Golfe	?	30% des besoins en 2010	
Californie	?	30% des besoins en 2010	
Espagne	28%,	?	Augmentation de 150% en 2012
Chine		?	Prévu : 55% besoins urbains et 14% besoins industriels (28 M ^d m ³ /an)

Les utilisations des eaux recyclées sont très différentes d'un pays à l'autre, plus particulièrement en ce qui concerne le Japon :

Pays	Volume 10 ⁶ m ³	Agriculture %	Environnement Urbain %	Industrie %	Toilettes %	Récupération d'énergie %
Californie	430	68	32		-	-
Japon	210	8	33,5	16,5	34,5*	7,5

* Installations individuelles pour 96% ;

La récupération de chaleur est à noter en particulier car d'un point de vue thermodynamique il s'agit d'une énergie de qualité inférieure du fait de sa faible température mais l'expérience nippone a montré qu'il est possible de l'utiliser pour la climatisation et le chauffage (Tokyo) ou la fonte de neige (Saporo) :

¹ Dans la littérature anglo-saxonne, les eaux grises désignent les eaux de toilette et de lavage, par opposition aux eaux noires qui désignent les eaux vannes, urine, excréta et eaux de chasse.

² Suivant en cela l'avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France, le Ministre de la santé n'a pas autorisé ce type de recyclage ; les deux raisons principales en sont

- les risques de mauvais branchement,
- l'augmentation des risques sanitaires en cas d'épidémie.

- A Tokyo, une pompe à chaleur récupère l'énergie calorifique des eaux usées (dont la température varie entre 12°C et 23°C) pour abaisser la température de l'eau du circuit de climatisation et chauffage d'environ 5°C au-dessous de 15°C pour la climatisation et pour l'élever d'environ 5°C au-dessus de 40°C pour le chauffage. Dans les instructions des services de l'agglomération de Tokyo il est recommandé une distance maximum de transport de 1 000 m. Il existe à Tokyo 11 systèmes de pompes à chaleur fournissant 32 000 MJ pour le chauffage et 42 000 MJ pour la climatisation à partir 70 000 m³/j d'eaux usées.
- A Sapiro il existe un triple problème de neige : le ramassage, le stockage, la pollution par la neige fondue (des mesures ont fourni une concentration de MES dans la neige fondue de 1 700 mg/l). La solution retenue a été d'aménager les installations de collecte et de stockage des eaux pluviales inutilisées en période de neige : les bassins sont utilisés pour fondre la neige avec des eaux usées (3,5 millions de m³ d'eaux usées ont permis de fondre 0,3 millions de m³ de neige³), des canaux ont été ouverts pour évacuer la neige avec les eaux usées traitées et des ouvrages ont été construits dans les quartiers centraux pour jeter la neige sale dans les égouts unitaires afin de la transporter et la fondre avec les eaux usées et traiter l'ensemble dans l'usine. Le coût pour faire fondre 1 m³ de neige est compris entre 6,6 € et 8,5 €.

En ce qui concerne l'utilisation des eaux usées pour l'arrosage des cultures et espaces verts, la situation dans les pays d'Afrique du nord et la Mauritanie, est la suivante⁴ :

Utilisation des eaux usées pour l'arrosage (millions de m³)

	Mauritanie	Maroc (94)	Algérie (85)	Tunisie (96)	Libye (98)
Production d'eaux usées		370	660		450
Eaux usées traitées	0,7			116	40
Eaux usées traitées réutilisées	0,7	*		9	33

*Expérimentation en cours

En Mauritanie une partie des eaux de Nouakchott est livrée aux agriculteurs.

Au Maroc plusieurs expériences sont en cours (en particulier à Ouarzazate).

En Algérie il serait possible d'irriguer 20 000 ha dans la Mitidja et 125 000 ha dans tout le pays mais l'urgence pour le moment est la remise en état des installations.

La Tunisie a réalisé de nombreuses expérimentations, équipé 6 200 ha et envisage l'équipement de 20 000ha (5% de la superficie irriguée) pour 2020.

La Libye qui a équipé d'importantes surfaces fait face à des difficultés de maintenance telles que la priorité est la remise en service des équipements.

1.2 Composition des eaux usées

Actuellement les eaux usées réutilisées sont les eaux des réseaux urbains d'eaux usées constituées d'un mélange d'eaux de lavage, d'eaux vannes, rejets d'activités artisanales et parfois il s'y ajoute les eaux

³ En théorie 1 m³ d'eaux usées permet de fondre 0,2 m³ de neige

⁴ Source : Jean-Robert Tiercelin., rapport de mission au Maghreb (1999)

pluviales et les rejets autorisés d'unités industrielles ; l'objectif en matière d'assainissement a été longtemps d'évacuer le maximum de déchets par dilution.

Or si on examine la composition des différentes eaux usées, on constate que les composants sont les mêmes mais que leur part dans le mélange est très différente :

Compositions des eaux rejetées par les ménages (charges annuelles) :

Composants	Eaux grises (eaux de lavage)	Eaux noires (eaux vannes)		Eaux noires kg/an/personne	Eaux grises et noires kg/an/personne.
		Urine	Matières fécales		
N	8%	85%	7%	2,93	3,2
P	40%	35%	25%	0,29	0,48
K	26%	57%	17%	0,24	0,33
COT	44%	11%	45%	15,3	27,2

Source Ralph Otterpohl⁵.

Au cours du congrès IWA de Berlin en octobre 2001, il a été proposé certaines réalisations en Allemagne et en Suède où les eaux usées sont séparées pour faciliter le traitement et la réutilisation. Cela a conduit à la mise au point de toilettes permettant de séparer l'urine. Compte tenu de leurs caractéristiques différentes, il semble souhaitable d'envisager des traitements séparés pour des usages appropriés :

- les eaux grises peuvent être traitées dans un étang artificiel rempli de sable grossier,
- les eaux noires peuvent être mélangées aux déchets organiques de cuisine, de composition semblable, stérilisées et traitées dans un digesteur anaérobie,
- les urines contiennent de nombreux produits récupérables par évaporation.

1.3 Historique de l'utilisation des eaux usées

Historiquement l'utilisation des eaux usées est très ancienne et se faisait à l'origine sans traitement. Deux exemples peuvent être cités, en France et en Australie :

- Après la construction du réseau d'égouts de Paris commencée en 1856, il a été décidé, pour éviter les rejets en Seine, d'adopter un programme d'épandage étudié de 1868 à 1872 sur des champs d'épandage à Clichy et Gennevilliers mais réalisé seulement en 1895 en raison du délai nécessaire pour faire adopter la loi qui en définissait tous les aspects techniques, administratifs et financiers. Les champs d'épandage de Gennevilliers (900 ha) et d'Achères (3 zones pour 4360 ha) recevaient 160 Mm³/an (250 Mm³/an continuant à être rejetés en Seine). L'irrigation des légumes consommés crus était interdite. Les doses d'arrosage étaient de 40 000 m³/ha/an pour les légumes et de 60 000 m³/ha/an pour les herbages. Si le risque sanitaire a été signalé dès les débuts, le risque entraîné par l'accumulation des métaux lourds dans le sol et les plantes n'a été perçu que récemment⁶. Le développement des installations de traitement (première installation réalisée entre 1935 et 1940) et de la réglementation (lois sur l'eau de 1964 et 1992) ont conduit à un abandon progressif depuis 1950 :

Année	Surface	Volume d'eaux usées
1904	5 100 ha	200 Mm ³ /an
1950	5 000 ha	100 Mm ³ /an
1980	2 010 ha	40 Mm ³ /an
2000	En voie de disparition	

⁵ Directeur de l'Institut de gestion des eaux usées ménagères et industrielles de l'Université technique de Hambourg-Harbourg

⁶ Rapport Dupré, IGGREF, sur l'accumulation du chrome dans le thym

- L'épuration et la réutilisation des eaux usées ont été pratiquées en Australie depuis 1880 avec l'adoption pour des raisons sanitaires à Adélaïde (Australie du Sud) de l'épandage des eaux usées sur des pâturages et des cultures maraîchères. En 1936 cette pratique a été arrêtée à la suite de maladies. Dans les années 1950 et 1960, la réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage des golfs et espaces verts s'est développée suivant les opportunités et en 1993 elle a été encouragée par le gouvernement de l'Etat qui l'a réglementée dans la loi pour la Protection de l'Environnement de 1995.

1.4 Perspectives de l'utilisation des eaux usées

1.4.1 Plans directeurs d'utilisation des eaux usées traitées

Malgré l'existence de nombreux pays qui souffrent d'un manque de ressources en eau et l'intérêt de la réutilisation des eaux usées, peu d'entre eux ont établi un plan directeur de réutilisation des eaux usées. Il est toutefois intéressant de noter les propositions faites par Gérard Monchalain pour Maurice en 1995 pour servir de cadre à un futur plan directeur.

Les eaux usées traitées peuvent être utilisées :

- directement en irrigation,
- indirectement pour la recharge des nappes souterraines en vue de s'opposer à l'intrusion du biseau salé dans les aquifères côtiers.

Leur utilisation éliminera la cause majeure de la dégradation du milieu marin et notamment du lagon.

Maurice dispose d'atouts favorisant cette option :

- les stations d'épuration ne sont pas encore construites et il est donc possible de choisir les filières les mieux adaptées à la réutilisation,
- le coût de mobilisation des eaux usées réutilisables (10 à 20 roupies par m³) est inférieur au coût de mobilisation des eaux de surface par un barrage (30 roupies par m³),
- les techniques d'irrigation adaptées à la réutilisation des eaux usées sont bien maîtrisées, micro irrigation, aspersion (pivots et couverture totale) et même raie à condition d'introduire les rampes à vannettes,
- l'existence de sols à forte capacité d'infiltration permettra d'établir des zones de recharge.

Mais la mise en place d'un programme de réutilisation des eaux usées, si l'on veut aboutir à la suppression de tout rejet dans le milieu marin, nécessitera le prétraitement des eaux industrielles, la délimitation des zones de recharge, la mise en place d'un réseau de contrôle de la qualité des eaux, un programme de fertilisation tenant compte des apports des eaux usées traitées.

1.4.2. Réutilisation des eaux usées à la source

Certains spécialistes de l'environnement considèrent qu'il est nécessaire de développer une stratégie à long terme d'optimisation de l'utilisation des ressources en eau, de protection de l'environnement et de développement durable, dont un des éléments sera la réutilisation des eaux usées à la source à partir d'un système localisé de gestion des eaux usées contribuant à la protection de la santé publique et à la conservation de l'environnement.

Les principaux équipements nécessaires pour ces systèmes locaux sont ceux généralement utilisés aussi pour les systèmes collectifs :

Collecte et transport	Traitement		Réutilisation
Evacuations d'immeubles	<i>Traitement primaire</i>	<i>Traitement tertiaire</i>	Toilettes
Egouts gravitaires	Fosse septique	Charbon actif	Arrosages arbres et espaces verts
Egouts sous pression (avec ou sans pompe dilacératrice)	Filtres	Filtration	Lavage rues, voitures
Egouts sous vide	<i>Traitement secondaire</i>	Membranes	Irrigation de vergers, jardins
	Aérobie	Osmose inverse	Eau de refroidissement
	Anaérobie	<i>Désinfection</i>	
	Lagunes	Chloration	
	Bioréacteurs	Rayons UV	
	Membranes	Ozone	
		<i>Stockage</i>	

Des études ont été développées sur des systèmes de traitement des eaux grises (bains, douches, lavabos) comportant un filtre et un réservoir avec désinfection.

Cette réutilisation des eaux usées au niveau local ne doit pas être confondue avec l'assainissement non collectif qui est assuré par épandage

- souterrain (goutte à goutte, tranchées, plateau),
- surface (goutte à goutte, aspersion).

2 - Contraintes de qualité des eaux

En matière de qualité des eaux usées réutilisées après traitement deux risques doivent être pris en compte.

a. le risque sanitaire (microbien et chimique)

Les anglo-saxons (Australie) considèrent deux approches pour la détermination du risque associé à la présence de pathogènes dans les eaux recyclées :

- le calcul d'un risque théorique à partir de la probabilité d'infection en fonction de la dose (quantitative risk assessment) est une approche de haute technicité, coûteuse et permettant d'estimer des risques très faibles. Cette méthode permet de déterminer des risques d'un ordre de magnitude de 1 ou 2 inférieur à celui obtenu à partir des études épidémiologiques ;
- la détermination du risque réel ou attribué à partir d'études épidémiologiques (real or attributable risk) est une approche de technicité simple, d'un coût réduit et permettant de maîtriser le risque.

b. le risque environnemental pour les eaux et les sols (substances chimiques dissoutes, charge en nutriments)

Pour l'irrigation, il faut prendre en compte l'influence des excès de bore et d'autres éléments traces éventuels, l'affectation du rendement par la salinité, le risque d'alcalinisation des sols par excès de sodium, les brûlures de feuille par le sel en cas d'aspersion. En cas de désinfection au chlore, une déchloration en aval permet d'éviter d'éventuels dégâts dus au chlore résiduel sur les plantes arrosées. Par ailleurs pour éviter des excès de N,P,K il faut prendre en compte dans la fertilisation les apports des eaux usées.

Pour les eaux de process, la qualité exigée dépend évidemment du type d'industrie. La teneur en sels admissible peut varier de 0 (déméralisation totale), à une dureté de 5 à 10 ne demandant qu'un simple adoucissement ou jusqu'à 20 et plus. L'élimination de toutes les molécules organiques peut être indispensable ou seulement celle des plus grosses. Certains métaux peuvent être proscrits. La composition exigée est fixée par l'industriel.

D'autres questions sont actuellement débattues :

- la première est celle du contenu d'une réglementation susceptible d'une large application car il est nécessaire de choisir les paramètres représentatifs (5 ou 6 lorsque l'on se limite aux risques acceptables mais plusieurs dizaines lorsqu'on veut viser une sécurité maximum) et de fixer la valeur des normes à respecter impérativement et/ou des valeurs guides qu'il est recommandé d'atteindre,
- le paramètre utilisé pour caractériser le risque sanitaire est le nombre de coliformes alors que les spécialistes considèrent que ce paramètre n'est pas représentatif en ce qui concerne en particulier les protozoaires, Giardia lamblia et Cryosporidium parvum. Les analyses complètes (coliformes, bactériophages, œufs de nématodes, Giardia et Cryosporidium) entraîneraient une augmentation du prix de l'eau d'irrigation de 0,1 € par m³ alors que la seule détermination des coliformes et œufs d'helminthes la ramène à 0,03 €,
- la détermination complète du risque sanitaire nécessiterait des analyses aux différents stades de traitement (secondaire, tertiaire, désinfection) et au point d'utilisation (eau, végétation, sol, eau souterraine et éventuellement aérosols), ce qui entraînerait un coût prohibitif.

Après réutilisation de l'eau celle-ci peut continuer à évoluer de façon complexe. En particulier des études israéliennes ont montré que le sol peut réduire considérablement la concentration des pathogènes dans le sol dans le cas d'irrigation de surface mais surtout dans le cas de micro-irrigation, ce qui réduit fortement le risque sanitaire. Toutefois cette réduction n'est obtenue que si certaines conditions sont réalisées : humidité inférieure à l'humidité au champ et matière organique inférieure à 0,85 mg/l ou bien dans le cas de sols salés.

En ce qui concerne l'utilisation des nutriments contenus dans les eaux usées des études australiennes ont montré que le lessivage du phosphore contenu dans des eaux réutilisées après traitement secondaire (pertes : 11,5 kg/ha en irrigation continue, 11,75 kg/ha en irrigation alternée) est inférieur à celui provenant d'engrais chimiques (pertes : 16 kg/ha) sans toutefois considérer si cette différence n'est pas due simplement à la meilleure répartition des apports.

2.1 France

Pour l'irrigation à des fins agronomiques et agricoles, les recommandations du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France des 22/07/91 et 03/08/92 qui se réfèrent aux travaux de l'OMS (1989) s'appliquent dans l'attente d'un arrêté prévu par l'article 24 du décret n°94-469 du 3 juin 1994.

Normes bactériologiques et parasitologiques

Ce document fixe des normes bactériologiques et parasitologiques et définit trois niveaux sanitaires qui sont liés au type de culture ainsi qu'au mode d'irrigation et assortis d'exigences techniques et restrictions.

Niveau sanitaire	Mode d'irrigation <i>Type de culture ou d'utilisations</i>	Oeufs d'helminthes	Coliformes thermotolérants ⁷
------------------	--	--------------------	---

A	<ul style="list-style-type: none"> • Irrigation gravitaire, irrigation sous frondaison, limitant le mouillage des fruits et légumes <i>Produits pouvant être consommés crus</i> • Arrosage par aspersion sous réserve d'une distance suffisante des habitations, d'asperseurs de faible portée et de fonctionnement en dehors des heures d'ouverture au public <i>Terrains de sport (golf) et d'espaces verts ouverts au public</i> 	< 1/litre	< 1000/100 ml
B	<ul style="list-style-type: none"> • Irrigation gravitaire ou à la raie <i>Vergers, céréales et fourrages, pépinières et produits végétaux à cuire (pommes de terre, betteraves, choux, carottes, ...)</i> • Irrigation par aspersion sous réserve d'une distance suffisante des habitations, d'une absence de risque de propagation et d'inhalation des aérosols <i>Cultures ci-dessus et prairies</i> <i>Espaces verts inaccessibles :</i> <i>Zones de sport ou de loisir utilisées plusieurs semaines après l'arrosage.</i> 	< 1/litre	Sans contrainte
C	<ul style="list-style-type: none"> • Irrigation souterraine ou localisées (micro-irrigation), <i>Cultures céréalières, industrielles et fourragères, vergers, zones forestières et espaces verts non ouverts au public.</i> 	Sans contrainte	Sans contrainte

A titre indicatif, il est donné les valeurs retenues par l'OMS Oeufs d'helminthes : 1/litre
Coliformes thermotolérants : 1 000/100ml

Normes chimiques

Le même document distingue en ce qui concerne la qualité chimique des eaux réutilisées:

- la réutilisation d'effluents à dominante domestique, autorisée pour l'irrigation des cultures et l'arrosage des espaces verts,
- la réutilisation d'effluents à caractère non domestique assujettie à un examen particulier de leur qualité chimique : du fait de la présence possible (en quantité excessive) de micropolluants chimiques minéraux ou organiques, elle pourra être interdite dans certains cas.

Quelle que soit l'hypothèse le projet devra faire l'objet d'une demande d'autorisation de rejet requise au titre de la police des eaux.

2.2 Autres pays

En ce qui concerne la réglementation internationale, le constat général est qu'il existe une multitude de réglementations souvent difficilement comparables. Ces réglementations ont dans tous les cas pour objet de protéger la santé et l'environnement. Mais on peut distinguer deux écoles ayant des positions extrêmes :

- l'école californienne qui prône des mesures très strictes, le fameux " Title 22 " ;
- l'OMS qui impose des mesures moins contraignantes.

D'autres part la charge polluante et donc le risque sanitaire suivent la loi des rendements décroissants (schématiquement, réduire la charge polluante de 99 pour cent coûte deux fois plus cher que de la réduire de 90 pour cent), ce qui a conduit certaines autorités à distinguer des valeurs impératives et des valeurs guides.

Quelques exemples de réglementation ont été présentés lors du 1^{er} Congrès de l'IWA à Paris en 2000 :

⁷ ou " coliformes fécaux "

• Europe

Les dispositions retenues par les pays européens varient suivant les pays mais, même à l'intérieur d'un pays, il y a des différences entre les régions. Les deux exemples retenus concernent l'Italie et l'Espagne (Baléares). On peut ajouter la Grande Bretagne où il est uniquement demandé qu'il n'y ait pas de coliforme détecté.

Il faut aussi rappeler que la directive CCE n°76/160 "Eaux de baignade", fixe à 100/100ml les valeurs guides pour les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux, et à 2000/100ml la valeur impérative pour les coliformes fécaux.

Italie

Un débat sur les normes d'utilisation des eaux usées existe entre les tenants de l'adoption des normes de l'OMS et les tenants de normes strictes. Toutefois la faible concentration d'éléments traces dans les eaux usées des collectivités ne rend pas urgente la réglementation de ces éléments, à l'exception du bore, en particulier en ce qui concerne les agrumes (concentrations de 1,5 à 2 mg/l relevées dans les eaux urbaines).

Actuellement les normes utilisées varient suivant les régions :

	Coliformes fécaux*	Coliformes totaux	Streptocoques fécaux	Œufs de nématodes
OMS**	1 000/100ml			1/1
Italie		2,2/100ml****		
Emilie Romagne		2,2/100ml****		
Lombardie	1 000/100ml	5 000/100ml	1 000/100ml	
Pouilles		2,2/100ml****		
Sicile***	1 000/100ml	3 000/100ml		1/1

* Moyenne sur 7 jours consécutifs

** Guide sanitaire pour l'utilisation des eaux usées en agriculture et aquaculture

*** Réglementation générale pour l'irrigation

**** La qualité microbiologique actuelle des eaux de rivière utilisée pour l'irrigation en Italie (et sans doute dans beaucoup d'autres pays) devrait être considérée : habituellement les taux de coliformes totaux sont au voisinage de 1 000/100ml (ou supérieurs) sans qu'il y ait un risque épidémique évident.

NB : En Apulie les normes de qualité, établies récemment dans une perspective de sécurité maximum, comportent plus de 52 paramètres incluant des métaux lourds et des composants organiques.

Baléares

Des recommandations, non encore adoptées en 1996 comme normes par le Gouvernement des Baléares, ont été préparées pour les valeurs des principaux paramètres et les fréquences de contrôle applicables dans tous les cas sauf ceux d'irrigation souterraine ou de consommation en cuit (pas de limite).

Les différents usages de l'eau et les valeurs recommandées (paramètres et fréquences) sont les suivants :

Usages	pH	DBO ₅ (mg/l)	DCO (mg/l)	MES (mg/l)	E.Coli 100ml
Urbains : arrosage des parcs publics, golfs, cimetières, nettoyage des rues, service incendie*	6 à 9 semaine	<20 semaine	<60 mois	<30 semaine	<200 semaine
Irrigation souterraine parcs, jardins, vergers	6 à 9 mois	<120 mois	<340 mois	<180 mois	<3000 mois
Irrigation surface ou par aspersion des cultures consommées crues**	6 à 9 semaine	<30 semaine	<90 mois	<45 semaine	<200 semaine
Irrigation des végétaux consommés cuits (pomme de	6 à 9	<40	<120	<60	<1000

terre, navet)	mois	mois	mois	mois	mois
Irrigation des pâturages, fourrages, bois et forêts	6 à 9 mois	<40 mois	<120 mois	<60 semaine	<1000 mois

Autres critères

* Oeufs d'helminthes <1/100ml

Turbidité <5 UNT

Chlore résiduel après 30 minutes de contact <0,3 mg/l

** 15 jours entre la récolte des fruits et légumes et leur consommation)

Oeufs d'helminthes <1/100ml

• **USA :**

Irrigation

En plus de la réglementation générale de l'Agence pour la Protection de l'Environnement (EPA), chaque état a une réglementation propre, la plus importante étant celle de Californie (Title 22) et éventuellement celle de Floride.

Notons que pour les experts des USA il y a trois réglementations internationales : celle de l'OMS, celle des USA (EPA et états) et... les autres.

Etat	Coliformes		Virus	Helminthes	Physico-chimiques	
	Fécaux	Totaux	Entérovirus	Oeufs	Turbidité	MES
OMS*	1000/100ml			1/litre		
Californie**		<2,2/100ml Moy. 7 jours			<2 NTU	20-30mg/l
Arizona	2,2/100ml		1/40l		<1 NTU	
Floride***	2,2/100ml	Non détect. 75% échant.			<2 NTU	<5mg/l
Hawaï			1/40l			

* Guide sanitaire pour l'utilisation des eaux usées en agriculture et aquaculture.

** Title 22 cité très fréquemment en référence ; la réglementation prévoit en plus l'inactivation du virus de la poliomyélite / Irrigation des plantes consommées crues autorisée.

*** Irrigation des plantes consommées crues non autorisée.

Eau domestique

	Coli. totaux	Coli. fécaux	DBO5 mg/l	Turbidité NTU	Cl ₂ résiduel mg/l	pH
OMS	<200					
Normes de baignade*		<2 000				6-9
Minimum fédéral EPA	Non détect.		10	2	1	6-9

* Proposé comme valable pour les eaux domestiques recyclées

• **Australie :**

En matière sanitaire la réglementation fixe cinq niveaux (France trois), fonction de l'utilisation (importance des contacts avec l'eau) et liés, par ailleurs, au niveau de traitement

Propositions 1998 (Simpson) (en gras le projet de guide fédéral)

Niveau sanitaire	Description	Coliformes fécaux
*****	Potable	0/100 ml
A+****	Accès libre	1/100 ml
A*** ½	Contact élevé	10/100 ml
B***	Contact moyen	100/100 ml
C**	Contact faible	1 000/100 ml

D*	Accès limité	10 000/100 ml
----	--------------	---------------

NB En Nouvelle Galles du Sud il est imposé pour les zones urbaines et résidentielles le niveau A+****

Pour l'irrigation la Commission Santé et l'Autorité pour la Protection de l'Environnement de l'Australie du Sud ont proposé pour le traitement des effluents d'Adélaïde :

Coliformes fécaux	Pathogènes	Turbidité	
Valeur médiane		Moyenne	Maximum
10/100 ml	1/50l (objectif 0)	10 NTU	15 NTU

NB Ces valeurs prennent en compte le fait que la durée de séjour dans les bassins de stabilisation est en moyenne de 30 jours et n'est jamais inférieure à 16 jours.

Pour les usages urbains l'Australie (comme l'Afrique du Sud) exige que l'eau respecte la qualité des eaux potables et l'élimination totale des virus :

Coli. totaux	Coli. fécaux	DBO5	Turbidité
<2/100 ml	<1/100 ml	20 mg/l	2 NTU

• Pays d'Asie :

Des normes de qualité pour l'utilisation agricole des eaux usées ont été établies par la Chine (1997), normes très complètes et variables selon la culture (riz, culture de plein champ, légumes) et le Japon (1997), normes avec deux niveaux correspondants à des normes ou à des valeurs guides.

Des normes existent aussi pour les usages urbains, les toilettes et les industries.

Japon

Différents ministères ont proposé les critères et valeurs guides suivants :

Utilisation	Critères		Valeurs guides				
	Coliformes totaux	Chlore résiduel	Aspect	Turbidité	DBO	Odeur	pH
Eau pour les toilettes	1 000 /100 ml*	Traces	Bon			Bonne	5,8-8,6
Eau domestique	<10 /100 ml			<5 NTU	<10 mg/l		6-9
Irrigation zone urbaine	Non détecté	< 0,4	Bon			Bonne	5,8-8,6
Environnement	Non détecté		Bon	<10 NTU	<10 mg/l	Bonne	5,8-8,6

* La municipalité de Tokyo a adopté la norme du Titre 22 de Californie 2,2 /100 ml

Chine

Les critères retenus sont très nombreux, les principaux étant les suivants : (mg/l sauf autre spécification)

Utilisation	Coliformes totaux	Bactéries	Chlore résiduel	pH	Turbidité	MES	DBO ₅
Irrigation*	100/100ml			5,5 – 8,5			
Industrielle (national)**	1 000/100ml	1x10 ⁶ /ml	0,1 –0,2	6,5 - 9	5 NTU	1 000	10
Industrielle (local)***	300/100ml	0,5x10 ⁶ /ml	0,2	6 – 8	5 NTU	1 000	5
Urbaine (toilettes)****	0,3/100ml		0,2	6,5 - 9	10 NTU	1 200	10
Urbaine (lavage)****	0,3/100ml		0,2	5 - 9	5 NTU	1 000	10

* Réglementation nationale (1985) exceptées pour les productions végétales consommées crues ou cuites

Autres critères : salinité, chlorures et sulfates / Hg, Cr⁶, Pb, Cu, Zn, Se / Hydrocarbures, *allyl aldehyde* et Cd, As, CN, F, phénols volatils, benzène (niveau variable en fonction des caractéristiques de sol) *trichloride aldehyde*, Ba (niveau variable en fonction des cultures.).

- ** Réglementation nationale (1993) proposée pour les eaux industrielles de refroidissement et de process
Autres critères : DCO, SS / chlorures, alcalinité, dureté / Mn et NH₄-N (niveau variable selon la saison)
- *** Réglementation locale (1995) proposée pour la ville de Xian dans le Nord du pays
Autres critères : les mêmes que pour la réglementation nationale + couleur, LAS et conductivité
- **** Réglementation du ministère de la construction (1991)
Autres critères : DCO, SS, couleur / chlorures, NH₄-N, dureté / LAS, Fe, Mn .

Corée

En Corée il semble que les normes d'utilisation de l'eau pour l'irrigation (1996) aient été confondues avec les normes de rejet, variables avec le système hydraulique concerné (rivière, lac et réservoir, nappe), ce qui soulève quelques difficultés pour les nutriments et en particulier l'azote total. En effet des essais ont montré qu'avec des concentrations 25 fois supérieures aux normes, la production augmentait de 10% sans effets négatifs à long terme.

3 Procédés d'épuration et d'affinage

Bien que quelques rares exemples contraires existent, les eaux usées ne doivent pas être réutilisées brutes. Un traitement est toujours nécessaire, différent selon le type d'utilisation choisi. Pour l'irrigation et les utilisations urbaines, les objectifs principaux sont de :

- réduire les risques de colmatage,
- éviter les mauvaises odeurs,
- éliminer les microorganismes pathogènes, chaque fois que la réglementation l'exige,
- réduire la teneur en azote, quand la protection d'une nappe souterraine l'impose.

Les projets de réutilisation concernent souvent les effluents de stations d'épuration existantes et le traitement primaire ou secondaire devra être complété par un traitement tertiaire.

Les procédés d'épuration peuvent être classés en :

- procédés conventionnels (décantation primaire, lits bactériens, boues activées, biofiltration, dénitrification)
- désinfection (chloration, ozonation, UV, ultrafiltration)
- procédés extensifs (lagunage naturel, infiltration - percolation)
- stockage assurant une épuration complémentaire (en nappe, en réservoir intersaisonnier).

En fonction du type de réutilisation il est proposé différentes filières :

Utilisation	Procédés extensifs	Procédés conventionnels
Irrigations limitées (arbres, prairies)	Lagunage naturel Infiltration - percolation	Traitement secondaire (lits bactériens, boues activées, biofiltration)
Irrigations sans restrictions	Idem + désinfection ou stockage	Idem + filtration et désinfection
Arrosages urbains	Idem	Idem
Alimentation nappes	Idem + filtration sol	Idem + élimination N et P
Recyclage des eaux grises		Filtration + désinfection
Eau potable(directe et indirecte)		Traitement tertiaire + potabilisation (filtration sur membrane et désinfection)

Le choix des filières de traitement pour la réutilisation des eaux usées est une procédure délicate qui doit prendre en compte des aspects techniques (choix des procédés, évaluation des performances, infrastructures et équipements existants), réglementaires (normes), sociaux (spécificités culturelles, acceptabilité) et économiques (sources de financement des équipements et de l'exploitation) en vue de garantir une ressource alternative, à un coût économiquement acceptable, sans risques pour la santé publique et pour

l'environnement. Les exigences en matière de qualité sont souvent proches de celles exigées pour l'eau potable, quand ce ne sont pas les mêmes et pour de nombreux pays le recyclage de l'eau est une nécessité vitale. Ces contraintes peuvent conduire dans de nombreux cas à réaliser des installations pilotes et à prévoir de longues campagnes de suivi.

3.1 Compléments sur les procédés conventionnels

3.1.1. Coagulation – floculation - clarification

La décantation primaire ne permet que d'éliminer la fraction la plus grossière des matières décantables des eaux usées, entraînant un abattement des principaux éléments :

	Matières en suspension (dont matières organiques)	Virus et bactéries	Oeufs d'helminthes	Kystes de protozoaires
<i>Abattement</i>	40 à 60 % (dont 25 à 40 %)	10 à 30 %.	50 à 90 %*	moins de 50 %

* Plus important pour les schistosomes et les trichures que pour les taenias et les ascaris

Des traitements de coagulation et de floculation, mis en œuvre avant ou après un traitement biologique des eaux usées domestiques ou en épuration d'eaux industrielles, permettent, grâce à l'addition de réactifs chimiques, de séparer les fines particules en suspension et une partie de la fraction colloïdale. Après la coagulation et la floculation, la séparation de la phase aqueuse de la phase solide est réalisée par un traitement physique, décantation ou flottation. Il permet d'éliminer des matières en suspension ou colloïdales de 20 à 5000 A° décantant ou flottant difficilement.

Trois types de décanteur sont utilisés : à surface libre (1 m³/hm²), lamellaire (10 m³/hm²), à lit de boues (entre 20 et 30 m³/h.m² - *Clariflux/Neyrtec*). Certains décanteurs brevetés permettent des vitesses de filtration plus élevées : 20 à 100 m³/hm² - *Densadeg/Degrémont* (lamellaire à densification des boues), 50 à 80 m³/hm² avec l'*Actiflo/OTV* (lamellaire avec injection de sable).

Ces procédés permettent d'obtenir des abattements de 50 à plus de 90 % des matières en suspension. La charge polluante organique est réduite dans des proportions bien supérieures à ce que procure une simple décantation primaire. L'élimination des coliformes fécaux et des virus est fonction de la valeur du pH qui résulte de l'ajout de floculant.

3.1.2. Traitements biologiques secondaires

Suivant le procédé retenu (lits bactériens ou boues activées), l'efficacité sur les différents éléments caractéristique est variable. Les procédés biologiques modernes à biomasse fixée (biofiltration ou filtres biologiques) conduisent à une excellente élimination des MES et des matières organiques. On ne dispose pas de données relatives à leurs performances vis à vis de l'élimination des microorganismes pathogènes. On peut, en première approximation, estimer qu'elles ne diffèrent pas sensiblement de celles des stations à boues activées.

	MES mg/l	DBO5 mg/l	DCO mg/l	Virus	Bactéries	Kystes de protozoaires	Oeufs d'helminthes
Lits bactériens	30	30-40	90	30 à 40 %	50 à 95 %	83 à 99 %	20 à 90 %
Boues activées	30	25	100	90 %.	60 à 90 % jusqu'à 99 %	Peu d'effet	80 à 100 %
Biofiltration	80%		60 à 90%				

Mais l'évolution la plus importante s'est faite vers deux technologies nouvelles : les réacteurs biologiques à membrane et les filtres biologiques aérés (biofiltration) qui offrent tous deux un

faible encombrement et une grande qualité de traitement. Ces systèmes sont bien adaptés au recyclage des eaux domestiques. Une étude anglaise a comparé les performances des deux systèmes sur trois paramètres et confirmé la meilleure efficacité des membranes, comme barrière aux microorganismes en particulier :

Système	Abattement DCO %	Abattement MES %	Coli. Totaux U/100ml
Filtres biologiques aérés	77 à 89	81 à 88	10 ³ à 10 ⁶ (Abat 2 unit log)
Réacteurs biologiques à membrane	89 à 92	85 à 98	Général. 0 Touj. <1 000

Les coûts d'exploitation sont identiques à ceux des procédés classiques et les coûts d'investissement sont plus élevés, sauf cas particuliers qui conduisent à un coût total plus faible : une étude américaine fournit pour le procédé à boues activées et le procédé à réacteur biologique à membrane les coûts suivants, en US\$ par m³ :

Procédé	Coût d'exploitation	Coût total
Boues activées	0,19	0,63
Réacteurs à membrane	0,19	0,57

Pour la biofiltration, les réacteurs sont soit à co-courant (flux d'eau et d'air ascendants), soit à contre-courant (flux d'eau descendant). Les concentrations maximales admissibles en entrée sont de l'ordre de 200 mg/l de MES et de 400 mg/l de DCO. Ceci justifie un traitement préalable (décantation simple, coagulation - floculation, lit bactérien + décanteur intermédiaire, boues activées + décanteur intermédiaire).

Les techniques conventionnelles ne sont pas conçues pour réduire la teneur en azote des eaux usées. Pour y parvenir, la voie classique consiste à modifier un traitement biologique secondaire de telle sorte qu'un processus de nitrification - dénitrification puisse se développer. On procède soit en alternant des séquences d'aérobiose et d'anaérobiose, soit par recirculation.

Les biofiltres permettent aussi un abattement de la pollution azotée. Des rendements supérieurs ou égaux à 80% en nitrification ne peuvent être obtenus que pour des charges faibles ou en traitement tertiaire. Deux unités de biofiltration en série (élimination du carbone, puis de l'azote) améliorent la fiabilité de la nitrification. La consommation en énergie est élevée.

Un abattement significatif sur le phosphore (entre 30 et 60%) n'est possible qu'en cas d'adjonction de réactifs au niveau de l'étage précédent. En absence de traitement chimique à l'amont, l'abattement n'est que de l'ordre de 10%, ce qui correspond à l'assimilation bactérienne.

Dans le cas général les filières intégrant la biofiltration comportent :

- le traitement du carbone (et de l'azote dans le cas de charge en DCO faible) : prétraitement + décantation primaire ou coagulation - floculation + biofiltres,
- l'élimination du carbone et de l'azote par deux unités en série : prétraitement + décantation primaire ou coagulation - floculation + biofiltres (élimination C) + biofiltres (élimination N),
- un traitement complémentaire : boues activées (élimination C) + décanteur secondaire + biofiltres (nitrification).

La station prend beaucoup moins de place qu'une station à boues activées et est beaucoup plus facilement automatisable. Le taux de réduction des MES est bien meilleur, ce qui facilite le traitement tertiaire: avec 5 mg/l en sortie, on peut désinfecter aux UV sans filtration. La

nitrification est beaucoup plus poussée. Si la station est plus coûteuse en investissement, elle ne l'est pas beaucoup plus en exploitation.

3.1.3. Procédés à membranes

Le seuil de coupure des membranes définit quatre techniques dont les principales caractéristiques sont données ci-après :

		Microfiltration	Ultrafiltration (UF)	Nanofiltration (NF)	Osmose Inverse
Seuil de coupure	μm	0,1 à 0,2			0,001
	D *		100 000 à 500	300 à 600	
Porosité	μm	2,5 à 0,1	0,1 à 0,005		
	A°			8 à 50	< 20
Pression (Bars)		1	1 – 5 (évent. 0,7 – 10)	5 à 15	15 à 80
Perméabilité (m³/m².Bar.J)		10 à 100	1	0,1	0,01
Conditions de prétraitement			eau brute pH de 4 à 8, - turbidité < 80 NTU, - COT < 4 mg/l, oxydabilité MnO4K < 10	clarification poussée préfiltration	filtration sable ou < 5 μm correction chimique (SO ₄ H ₂ , Cl ₃ Fe, Cl gaz) antiincrustants
Posttraitement				évent. reminéralisation	reminéralisation
Utilisations	Clarification Désinfection (œufs et kystes) Fe, Mg, Al particuliers	Désinfection (bactéries, virus)		- Adoucissement - Décoloration - Elimination pesticides**	- Dessalement eau de mer ou saumâtre - Déminéralisation
Investissement (€/m³.j tout inclus)		750 si 100 m ³ /j 450 si 400 m ³ /j 300 si 1000 m ³ /j		600 si 10 000 m ³ /j 375 si 20 000 m ³ /j 300 si >100 000 m ³ /j	Majorque : 8 g/m ³ sel: 375 pour 30 000 m ³ /j
Exploitation (€/m³)		> 0,06	0,10 à 0,21	0,10 à 0,12 (hors main d'œuvre)	1,50 / 80 bars (eau/mer) 0,30 / 25 bars (8 g/m ³)

* D Dalton caractérise la masse molaire des particules

** 80% atrazine, simazine si seuil de 300 D

En annexe 1 il est indiqué les différentes utilisations de ces techniques.

Les techniques membranaires sont utilisées :

- soit après un traitement de coagulation – filtration,
- soit dans un procédé de boues activées (incluses en bassin ou en remplacement du décanteur secondaire),
- soit en traitement tertiaire après décantation secondaire en vue d'éliminer les bactéries dans l'effluent.

Ces procédés fonctionnent sous une forte ou moyenne charge volumique, mais dans des conditions de faible charge massique, voire d'aération prolongée. Ils sont applicables aussi bien à l'épuration d'effluents urbains ou industriels qu'au recyclage d'eaux industrielles et à la production d'eau potable. Il est possible d'opérer à âge élevé des boues, donc de réduire la production de boues en excès et de maintenir des bactéries à faible taux de croissance comme les bactéries nitrifiantes.

Dans le couplage avec un procédé par boues activées, les membranes remplacent le décanteur secondaire et permettent la rétention totale de la biomasse dans le bassin biologique. L'aération se fait par des orifices débouchant en dessous des membranes et assure l'apport d'oxygène nécessaire pour l'oxydation des matières organiques et azotées, le décolmatage des membranes, et

l'homogénéisation dans le bassin. Ces systèmes produisent peu de boues et conduisent à une grande qualité d'eau épurée.

Les unités peuvent être dimensionnées pour éliminer :

- par voie biologique, la pollution carbonée et la pollution azotée (nitrification - dénitrification avec bassin d'anoxie en tête),
- le phosphore par précipitation avec du sulfate d'alumine.

Un prétraitement par filtration préalable à 250 µ en entrée de station, avant le bassin biologique, est conseillé (colmatage des membranes). Les eaux de lavage sont renvoyées en tête de station après neutralisation.

L'Agence de l'eau Artois Picardie a effectué le suivi d'une station de traitement biologique par boues activées avec une zone d'anoxie et séparation des boues sur membrane immergée (microfiltration : pores de 0,4µ) de capacité 300 éq/h destinée à l'élimination de la pollution carbonée et la pollution azotée.

Les résultats sont excellents pour un coût d'équipement d'environ 200 000 € (dont 30 000 € pour le poste filtration) et un coût d'exploitation de 2,59 €/m³ :

Paramètres	Niveau de rejet (mg/l) (Conc. Max. sur Echant. Moy. Journ.)	Moyenne journ. (mg/l)	Taux d'abattement (%)
MES	<20	<2	99,5
DCO	<50	30	96,8
DBO5	<15	2	99,5
N global	<15 ou rendement minimum 70%	23	81
N NH ₄		2,2	
N total Kehdjaj			96,7
N NO ₃		18	
N NO ₂		0,25	
P total		8,9	40,4

Utilisée pour l'élimination des micropolluants, la nanofiltration élimine aussi les ions bivalents (jusqu'à 95%) en réduisant globalement la salinité (de 50 à 70%) mais en augmentant l'agressivité. Une reminéralisation est alors nécessaire pour corriger le titre hydrométrique (TH).

La filière n'a pas à inclure de reminéralisation quand le procédé est utilisé à d'autres fins (élimination de micropolluants, de microorganismes, réduction de la DCO). La nanofiltration est bien adaptée au traitement d'eaux contenant de 2 à 3g/l de sels et de 5 à 20 mg/l de carbone organique total (COT).

3.2 Elimination des microorganismes

Les techniques conventionnelles sont capables d'éliminer, dans des proportions variables, les matières en suspension et les matières organiques. Mais aucune d'entre elles n'offre une véritable protection vis à vis des risques sanitaires.

Les procédés conventionnels d'épuration primaire et secondaire ne garantissent pas l'élimination complète des œufs de parasite. Les effluents issus de ces stations, typiquement les effluents des stations à boues activées, sont du type C de la réglementation française.

Pour obtenir une eau de type B de la réglementation française, il faut éliminer pour une grande part les œufs d'helminthes, ce qui peut être fait en complétant la chaîne de traitement par un procédé extensif, une lagune de maturation ou un stockage ou encore une infiltration-percolation. Une filtration rapide

devrait aussi pouvoir remplir ce rôle mais les données qui pourraient confirmer son efficacité font encore défaut.

Une eau de type A de la réglementation française exige en plus l'élimination des coliformes fécaux par une méthode de désinfection. Ce traitement complémentaire revêt une importance particulière car, en dépit des restrictions imposées, les eaux de ce type permettent les réutilisations les plus attractives pour les collectivités locales. L'élimination des coliformes fécaux exige soit un traitement extensif soit un traitement conventionnel transposé des techniques de préparation des eaux potables. Ces techniques sont soit chimiques (utilisation du chlore et de ses dérivés, ozonation) soit physiques (rayonnements ultraviolets, ultrafiltration) et visent soit à la séparation des microorganismes (techniques membranaires), soit à leur destruction (désinfection). L'efficacité de ces procédés dépend, dans une large mesure, de la qualité de l'eau traitée et, en particulier, de sa teneur résiduelle en matière organique et en matières en suspension.

3.2.1. Elimination par les techniques membranaires

La nanofiltration est une barrière physique pour les molécules de masse molaire >200 D, convenant bien pour les eaux dures sulfatées, riches en MO, voire faiblement nitratées. Les rejets de concentrats peuvent atteindre 15% du débit d'alimentation. La nanofiltration livre une eau exempte de germes. Le chlore final nécessaire passe de 0,8 à 0,2 mg/l avec une meilleure qualité de l'eau dans le réseau. En matière de procédé à membrane, de très nombreux résultats ont été obtenus en ce qui concerne les différentes techniques, microfiltration, ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) ou osmose inverse.

Un des problèmes les plus fréquemment posés est celui de l'encrassement et de la réduction du débit. D'une façon générale les résultats obtenus par les différents types d'équipements sont satisfaisants.

Quelques valeurs du coût de ces traitements tertiaires sont disponibles : de 1,14 à 2,28 € par m³ pour des débits d'équipements convenables.

L'utilisation des membranes a été longtemps limitée aux installations industrielles de recyclage de faible capacité et il n'existe que peu d'installations collectives (5 à 10 000 m³ par jour).

Que les membranes soient utilisées en traitement secondaire ou tertiaire, les rejets ne contiennent pas de matières en suspension ni de bactéries. Pour les virus, la réduction est de 6 unités logarithmiques si ultrafiltration, 1 à 2 unités logarithmiques si microfiltration. Dans la station citée plus haut et suivie par l'Agence de l'eau Nord-Pas de Calais les réductions de germes pathogènes mesurées (4 mesures faites sur 5 mois) sont les suivantes :

- E coli : <60 à 190 par 100 ml
- Entérocoque : <60 à 1 300 par ml

Les coûts comparés des filières classiques et de celles avec NF ou UF, en notant que la filtration avant NF doit être de seuil de coupure 5 μ pour éviter le colmatage de la membrane, sont les suivants :

Capacité	Filière de traitement	investissement (F/m ³ .j)	Exploitation ⁽¹⁾ (F/m ³)
2300 m ³ /h 10 Mm ³ /an	préozonation / décantation/ filtration sable/ préozonation (O ₃ -H ₂ O ₂) / filtration CAG ⁽²⁾	1 400	0,40
	préozonation / décantation/ filtration / préozonation (O ₃ -H ₂ O ₂) / CAP ⁽³⁾ +UF	1 800	0,75

	préozonation / décantation / filtration / NF	2 250	1,10
50 m ³ /h	décantation / filtration / CAG	3 600	0,40
250 000 m ³ /an	décantation / filtration / CAP+UF	3 500	0,60
	décantation / filtration / NF	3 800	1,20

- (1) Les coûts d'exploitation n'incluent pas les coûts de main d'œuvre et d'amortissement de l'investissement.
(2) CAG : carbone actif en grains
(3) CAP : carbone actif en poudre

Ce tableau montre que les filières avec membrane sont plus coûteuses, mais que cette différence s'amenuise pour une petite capacité (50 m³/h). Néanmoins, quelle que soit la capacité, un affinage NF est plus cher qu'un affinage CAP+UF, le surcoût pouvant atteindre 25% en investissement et 50% en fonctionnement.

3.2.2. Désinfection

De nombreuses études sont menées sur l'efficacité des procédés de désinfection par le chlore, les UV, l'ozone, seuls ou en association, avec ou sans catalyseur (oxyde de titane TiO₂), tant du point de vue de l'action biologique que de l'achèvement de la minéralisation de la matière organique.

En matière de désinfection il est important de souligner la nécessité d'une réduction de la turbidité qui a conduit à imposer dans la réglementation de Californie une norme de turbidité inférieure à 2 NTU.

Les œufs d'helminthes et les cryptosporidiums (protozoaires de 4 à 6 μ) ne seraient pas détruits par les UV ni par le Cl, mais sont détruits à 99% par O₃ ou peuvent être arrêtés par microfiltration.

• Rayonnement UV

Les rayons UV-C 254 nm détruisent l'ADN, vital pour les microorganismes. L'utilisation de lampes à basse pression de Hg (durée de vie 8 000h à 15 000h) évite la formation de composés chimiques indésirables. A haute dose et à 185 nm, les UV réduisent le COT. Les principaux objectifs sont :

Eau potable	Eau industrielle	Eaux résiduaires
- respect des exigences microbiologiques - potabilisation	- exigences microbiologiques spécifiques (boissons, cosmétiques, pharmacie) - désinfection, réduction COT	- directive CE eaux de baignade - recommandations CSHPF pour l'irrigation - désinfection

Pour les eaux résiduaires, on peut citer une configuration de réacteur, développée par SAUR et STEREAU, avec des lampes disposées verticalement s'affranchissant du système de régulation de niveau (dysfonctionnements), donc d'une grande fiabilité.

Le système modulaire TAK de WEDECO en Allemagne dispose d'un système automatique de mesure de l'intensité des UV dans l'eau, qui émet un signal d'alerte en cas de désinfection incomplète et agit sur une commande automatique de l'intensité d'émission des lampes. De très importantes installations ont été équipées avec ce système : Manukau en Nouvelle Zélande pour

la protection des eaux marines (8 000 lampes pour 50 000 m³/h), Edimbourg pour l'application de la directive baignade (2 000 lampes pour 22 000 m³/h).

Sur la station d'épuration de La Ferté-sous-Jouarre (15 000 éq.h), avec une dose moyenne de 30 W.s/cm², le traitement UV a permis un abattement de 4 U log sur les coliformes thermotolérants totaux (moyenne 0,64.10⁶) et de 3,3 U log sur les streptocoques fécaux (moyenne 0,11.10⁶), ce qui se traduit par une teneur en germes résiduels inférieure à 100/100ml (niveau guide de la directive CE "Eaux de baignade").

La désinfection par UV ne forme pas de produits de réaction avec les matières organiques de l'eau. Une bonne efficacité suppose une bonne transmittance de l'eau traitée (turbidité <1 NTU). Les UV sont déconseillés pour les eaux chargées en matière organique, Fe, Mn ou trop carbonatées (dépôts importants sur les lampes inhibant le rayonnement). Un nettoyage périodique des lampes est indispensable (favorisé par un réacteur à disposition verticale des lampes diminuant les dépôts) et il faut aussi contrôler leur vieillissement. Pour une distribution d'eau stérile en réseau, une injection complémentaire de désinfectant à effet rémanent (Cl, Cl O₂, chloramines) est nécessaire.

L'efficacité des UV est certaine sur les germes, mais il faut se méfier des méthodes d'analyse utilisées pour tester leur efficacité, car il est difficile de bien compter les bactéries réellement tuées: certaines ne sont que provisoirement altérées, "en dormance". Il faut donc attendre un certain temps avant de dénombrer les bactéries pour être sûr qu'elles sont bien tuées. Des essais de traitement sur pilote sont conseillés pour des installations importantes.

Le coût d'une unité de 25 m³/h est compris entre 30 et 50 000 F suivant la qualité des eaux brutes.

- Chloration

Pour la production d'eau potable, le chlore assure une action rémanente dans les réseaux et réservoirs s'opposant à la reviviscence bactérienne. Il est souvent considéré indispensable de ce point de vue comme dans le cas précédent. Mal utilisé, le Cl ne détruit pas les virus. Pour réduire le risque de prolifération ultérieure, la double filtration sable-CAG ou les techniques membranaires (NF, UF+CAG) sont bien adaptées mais par contre l'ozonation O₃+CAG est déconseillée. En Chine la filière conseillée est la suivante :

Effluents secondaires > Filtration sur sable et textile > Désinfection au chlore

Le chlore en réagissant avec la matière organique peut former des produits nocifs (trihalométhanés⁸ ou THM, dont le chloroforme, réputés cancérigènes, et une furanone, le "MX", réputée mutagène) ou indésirables (goûts et odeurs). L'eau de Javel contient des bromates et des résidus de métaux. Pour ne pas nuire au goût et n'entraîner qu'une formation limitée de sous-produits, le résiduel de Cl en réseau doit être aussi faible que possible (de 0,1 à 0,2 mg/l en notant toutefois que pour l'eau potable les normes américaines sont : 4 mg/l pour le chlore, 4 mg/l pour les chloramines, 0,8 mg/l pour le bioxyde de chlore).

⁸ La formule générale des trihalométhanés est CHXX'X'' où X, X', X'' peuvent être un ou plusieurs atomes de fluor, de chlore, de brome ou d'iode. En matière de contamination des eaux, 4 sont importants : chloroforme CHCl₃, bromoforme CHBr₃, monobromodichlorométhane CBrCl₂, dibromochlorométhane CBr₂Cl.

A des doses trop élevées (nettement supérieures à celles de ces normes), le chlore est un élément nuisible surtout en aspersion. Mais, ce qui est plus grave, les produits nocifs cités au paragraphe précédent sont disséminés dans l'environnement et sur les plantes en cas d'aspersion. La chloration des eaux usées ne semble donc pas un procédé adapté à leur réutilisation, surtout pour l'irrigation.

L'OMS préconise pour la chloration une eau à moins de 0,5 NTU et à pH inférieur à 8 avec un résiduel de chlore libre supérieur à 0,5 mg/l après 3 minutes de contact.

Les coûts sont fournis par le tableau ci-dessous

Equipement	Investissement	Fonctionnement	Renouvellement des bouteilles
Pompe doseuse 7 à 8g/h (35 m ³ /h) résiduel 0,2 mg/l	10 000 F		
Chloromètre bouteilles Cl gazeux	>25 000 F	10 000 F/an	15 à 25 F/kg Cl.

Le dioxyde de Cl ne génère pas de problème de goûts, ne forme jamais de trihalométhanes, et a un effet biocide plus important que le Cl à des pH > 7,5. Mais son coût est plus élevé, sa mise en œuvre plus compliquée et la décomposition du dioxyde peut donner des chlorates Cl O₃⁻ et des chlorites Cl O₂⁻ conférant à l'eau une saveur métallique désagréable, considérés comme toxiques et qui ne peuvent pas dépasser une concentration maximum aux USA.

La chloration - déchloration des eaux usées a fait l'objet d'une expérimentation à Canet en Roussillon (5 à 6 000 m³/j) sur des eaux usées ayant subi un traitement de trois origines : filière biologique, filière physico-chimique, filière mixte. La gestion se faisait par automate adaptant automatiquement la demande en chlore à l'eau : la déchloration est quasiment totale (<0,1 mg/l de chlore résiduel) mais il faut être très rigoureux sur la gestion de la déchloration pour éliminer les chloramines qui peuvent se former lors de la chloration. Le temps de passage doit être d'au moins 40 minutes.

- Ozonation

C'est le procédé le plus efficace contre les bactéries et virus sans effets de reviviscence après plusieurs jours. Une concentration c de 0,4 mg/l pendant un temps de 4 minutes ($c.t = 1,6$) est recommandée pour détruire bactéries pathogènes et poliovirus. Il faudrait $c.t = 2$ pour éliminer complètement les kystes de Giardia. L'eau à désinfecter ne doit plus contenir de manganèse soluble ($Mn^{2+} < 0,03$ mg/l) et sa teneur résiduelle en MO ne doit pas provoquer de précipité après ozonation. L'ozone n'a pas de pouvoir rémanent ni d'effet bactériostatique sur le biofilm. Si l'eau à traiter contient des bromures, l'ozonation peut donner des ions bromates réputés cancérigènes, ce qu'on peut souvent éviter en modifiant les conditions chimiques du milieu : simulation des cinétiques chimiques sur ordinateur, permettant d'enlever les précurseurs pour éviter les sous-produits.

L'ozonation en tête de filière permet d'inactiver les cellules algales (génératrices de couleurs, saveurs, THM, MO, éléments toxiques...) et aussi d'oxyder des minéraux comme Fe et Mn, qui sont ensuite éliminés lors des étapes de clarification. Anjou-Recherche et Trailgaz ont développé le procédé Flottazone, combinant dans le même réacteur ozonation et flottation, ce qui supprime les problèmes d'algues dans la filière, tout en conservant les avantages de la préozonation (oxydation des minéraux, suppression de la préchloration et de l'accroissement corollaire des THM).

L'ozonation est aussi utilisée dans la réduction de la DCO non biodégradable (surtout certains effluents industriels, lixiviats), mais toujours en couplage avec un autre procédé : affinage

biologique (Messer-Wedeco), bioréacteur à membrane (Degremont), UV (réacteur intégré Chemnox d'Air Products), car l'ozonation seule ne réduit pas de plus de 10% la DCO non biodégradable.

Comme pour la chloration, des précautions doivent être prises pour ne pas produire de molécules organiques indésirables lorsqu'on traite à l'ozone une eau chargée en matières organiques.

3.2.4. Traitements tertiaires

Les traitements tertiaires sont généralement une combinaison de ces différents procédés et le tableau ci-après présente quelques résultats recensés.

Site	Filière	Résultats	Capacité m ³ /J	Utilisation	Prix US\$/m ³
Japon					
Chiba	Coagulation Filtration Ozonation Chloration	Coli : nd / Cl ₂ résiduel : 1,4 DBO ₅ : 1 / DCO 4,8 / MES : 1 Coul. 5 / N tot. :15 / P tot. : 0,06	4 120	Toilettes / Lavage, arrosage Centre congrès, bât. commerciaux, hôtels, parcs	Com. : 1,75 Pub. : 0,88
Kobe	Filtration Ozonation Chloration	Coli : nd / Cl ₂ résiduel : 0,04 DBO ₅ : 5 / DCO 10,1 / MES : 1 Coul. 5 / N tot. :32 / P tot. : 0,6	2 100	Toilettes / arrosage parcs Lavage, bât. commerciaux, écoles, parcs,	Com. 1,67 Priv. : 1,00
Fukukoa	Filtration Ozonation Chloration	Coli : <10 / Cl ₂ résiduel : 3,1 DBO ₅ : 3 / DCO 7,1 MES : <2 Coul. 4 / N tot. :20 / P tot. :1	4 500	Toilettes / arrosage parcs Lavage, bât. commerciaux, écoles, parcs,	3,00

En ce qui concerne la réutilisation des eaux usées, une étude menée à Taiwan sur une station utilisant la filière traitement secondaire biologique et chloration, assurant une réduction de 75% des MES, de 70% du carbone organique total et de 85 % des coliformes totaux, a conclu à la possibilité d'utiliser l'eau traitée comme eau de refroidissement avec toutefois d'éventuels traitements spécifiques par l'utilisateur pour limiter les risques de corrosion, de dépôt ou de présence de microorganismes lorsque le refroidissement s'effectue en circuit fermé. Dans le cas de tours de refroidissement d'air conditionné il est recommandé de prévoir une désinfection (la meilleure efficacité serait obtenue avec O₃) pour l'élimination éventuelle de Legionella pneumophila. Ces traitements peuvent entraîner un coût de l'eau supérieur à celui de l'eau potable.

3.3 Procédés extensifs

Associés aux systèmes conventionnels de traitement secondaire, les traitements extensifs constituent d'excellents dispositifs tertiaires aptes à réduire les risques liés aux microorganismes pathogènes.

Les avantages de ces techniques sont leur fiabilité, la simplicité de leur gestion et la modestie des coûts de fonctionnement.

On distingue deux grandes catégories de systèmes extensifs : l'épuration par infiltration et le lagunage.

3.3.1. Infiltration - percolation

L'infiltration - percolation consiste à infiltrer les eaux usées issues de traitements primaires ou secondaires dans des bassins de faible profondeur creusés dans le sol en place⁹ ou remplis de massifs sableux rapportés. Ces installations sont alimentées par remplissage ou par des pivots ou des rampes mobiles de manière à garantir l'homogénéité de la répartition sur les surfaces d'infiltration.

Les matières en suspension sont arrêtées par le massif filtrant, leur accumulation dans la tranche superficielle entraînant un colmatage qui doit être géré en alternant phases d'infiltration et phases de séchage.

L'épuration nécessite une infiltration en milieu poreux non saturé et le renouvellement de la phase gazeuse par l'air atmosphérique qui apporte l'oxygène indispensable à l'oxydation des matières organiques et de l'azote. Ce renouvellement passe par une infiltration intermittente.

Les micro-organismes contenus dans l'eau usée sont éliminés par filtration mécanique, adsorption et dégradation microbienne. En raison de leur taille, les protozoaires et les helminthes sont retenus par filtration mécanique dès les premiers centimètres du sol. L'élimination des virus et des bactéries est fonction du milieu poreux, de la vitesse de percolation, de l'épaisseur de massif filtrant traversée et, au moins pour les germes témoins de contamination fécale, du niveau d'oxydation de l'eau filtrée.

Dans des installations modernes d'infiltration - percolation destinées à traiter des effluents secondaires, les abattements des coliformes fécaux sont compris entre 2 et 4 unités logarithmiques et ceux des bactériophages entre 1,5 et 3 unités logarithmiques.

C'est aux Etats-Unis et en Allemagne que le procédé d'infiltration - percolation s'est développé avec des taux d'infiltration de 0,05 à 0,10 m/j (50 à 100 l/m².j). En France, c'est sur la dune de Port Leucate en 1980 que la première expérimentation a été faite d'abord sur des effluents bruts. Mais, en général, ce procédé est employé comme traitement secondaire ou tertiaire.

En Israël, à Dan, dans la région de Tel-Aviv (1,3 million d'habitants, 270 000 m³/j d'eaux usées en moyenne), le procédé est utilisé après boues activées et lagunage de finition pour recharger la nappe dans laquelle on pompe l'eau potable. Il a été démontré que la nappe apporte un complément d'épuration (système israélien SAT : Soil Aquifer Treatment).

Pour l'azote nitrique, la teneur en sortie de traitement secondaire est d'environ 40 mg/l; elle est réduite de 15 à 20 % par l'infiltration - percolation. Ceci correspond à une teneur en nitrate de 140 à 150 mg/l, mais la nappe n'est alimentée que partiellement par les eaux usées traitées. Il faut toutefois vérifier le bilan en nitrates. En cas de problème, il est possible de mettre en place un étage de dénitrification en fin de traitement secondaire : c'est un peu plus cher en investissement, mais plus économique en fonctionnement. Le taux d'azote est alors au maximum de 15 mg/l, ce qui correspond à un maximum de 50 à 55 mg/l de nitrates dans l'eau apportée à la nappe.

L'infiltration – percolation permet :

- d'éliminer la pollution organique et les MES (traitement secondaire) avec conditions de dimensionnement et d'exploitation particulières,
- de décontaminer ou nitrifier un effluent secondaire (traitement tertiaire), avec procédure de gestion spécifique pour éliminer l'azote au delà de 20 à 30%,
- d'effectuer un traitement poussé des effluents (secondaire + tertiaire) alors qu'aucune filière n'est encore en place.

⁹ Ce procédé peut être utilisé sur massifs sableux en place comme sur le pilote de l'Etang Salé

Les deux derniers cas sont spécialement adaptés à la protection des milieux récepteurs sensibles et à la réutilisation des eaux usées. Il faut aussi signaler que des filtres avec ventilation permettent le traitement d'eaux industrielles à forte charge organique (DCO de 4 000 mg/l réduite à 250 mg/l).

Quelques réalisations existent en France : en traitement tertiaire, au niveau de 40 000 éq.h, en traitement secondaire + tertiaire au niveau de 15 000 éq.h et aussi en stations d'épuration classiques au niveau de 6 à 7 000 éq.h. Les données sur quelques stations sont indiquées ci-dessous :

Description

Site	Nombre d'éq.h	Débit jour m ³ /j	Surface (Bassins ou irriguée) m ²	Gestion	Hauteur d'eau m/j	Coût KF
Port Leucate	40 000	4 000-5 000	4 500 x 2	2 bachées	0,30	
Ruoms	9 000		450 x 4	Rotation 2 bassins	0,50	900
Aubenas	24 000	325	500 x 15	A sec 14 h/j	0,70	
Etang salé* Réunion	3 000	300	1 000	8h/24 nuit arrêt 2j/15j	0,30	400

* raisons du choix de l'infiltration – percolation

- absence de rivière à écoulement permanent à proximité pour recevoir les effluents
- besoins d'irrigation dans les environs immédiats
- zone sableuse propice à l'infiltration –percolation et à la recharge de la nappe en l'absence d'irrigation.

Résultats

Site	Coli tot 100 ml	DBO5 mg/l	DCO mg/l	MES mg/l	NH4+ mg/l	NO3- mg/l	N mg/l	P mg/l
Port Leucate	10							
Ruoms	200-1 000		15-20	1-6			<5 (NK)	
Aubenas	<500 (qqf 0)	4	33	1,2	0,5	1,5	3 (NGL)	5,0
Etang salé Réunion	10-100 (qqf 5-10)					<30 (qqf 3,5)		

Tous ces exemples montrent qu'une infiltration - percolation bien conçue et bien exploitée permet d'atteindre le niveau A des recommandations du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France.

3.3.2. Lagunage naturel

L'épuration par lagunage résulte de processus aérobies et anaérobies qui se développent dans plusieurs bassins peu profonds disposés en série que l'on appelle aussi bassins de stabilisation. On distingue trois types de bassin selon le processus mis en jeu:

- les prébassins (facultatifs),
- les bassins aérobies,

- les bassins de maturation (aérés ou non aérés).

Les principaux processus sont :

- décantation des MES, digestion anaérobie des matières décantées,
- oxydation des matières organiques biodégradables par les bactéries hétérotrophes,
- synthèse des algues, elle mêmes productrices d'oxygène.

Pour aboutir à l'élimination la plus complète possible des matières organiques, de leurs produits de dégradation, des nitrates et des phosphates le système doit comprendre :

- un ou deux bassins à microphytes d'environ 1,20 m de profondeur, pour environ 1/3 de la surface totale de bassin, fonctionnant en parallèle pour faciliter les curages périodiques,
- deux ou trois bassins à macrophytes plantés, d'environ 0,40 m de profondeur, en série.

La surface totale nécessaire est en gros de 10 m² par éq.h.

Au niveau du traitement secondaire, un suivi SATESE de lagunages récents à microphytes + macrophytes a montré des abattements de 99% en DBO₅, 93 à 99% en MO¹⁰, 94 à 99% en MES, 91 à 99% en NKT, c'est à dire égaux ou supérieurs à ceux de stations traditionnelles avec dénitrification complémentaire. Le lagunage naturel demande moins d'investissement et surtout beaucoup moins de frais de fonctionnement qu'une station à procédés intensifs, mais il est consommateur de terrain (environ 1 ha pour 1 000 hab.), beaucoup plus que l'infiltration percolation (500 m² pour une population égale avec un rejet de 100 l/hab.j, avec une infiltration de 0,20 m/j en traitement secondaire + tertiaire). La biomasse végétale produite par le lagunage est de 5 à 30 T/ha/an.

L'élimination de la DBO₅ est significative, mais une partie importante de la DCO incidente se retrouve dans les effluents du lagunage sous forme d'algues. En période estivale, quand le lagunage est bien dimensionné, une large fraction de l'azote et une part importante du phosphore sont éliminées.

Les études ont démontré que les systèmes de bassins de lagunage en série peuvent produire des effluents conformes aux normes d'irrigation sans restrictions de l'OMS (moins de 1 000/100ml coliformes fécaux, moins de 1/l œuf d'helminthes) pour un temps de séjour de 20 à 90 jours suivant les conditions climatiques.

Les protozoaires et les helminthes sont éliminés essentiellement par décantation. Il semble que 100 % d'entre eux puissent être éliminés par tous les lagunages bien conçus, comportant plusieurs bassins et avec un temps de rétention supérieur à 20 jours.

L'élimination des bactéries a lieu, pour l'essentiel, dans les bassins aérobies. On sait qu'elle est notamment fonction de l'ensoleillement, du temps de séjour et de la température. Pour fixer les idées, on peut dire que la teneur en coliformes fécaux de l'effluent d'un lagunage bien conçu (pas de cheminement préférentiel - au moins trois bassins profonds de 1,2 à 0,7 m - temps de séjour supérieur à 60 jours - températures de l'ordre de 20°C), n'excède pas 1 000/100 ml. Les temps de séjour prolongés, associés à une bonne exposition de l'eau à la lumière solaire, confèrent aux lagunages de bonnes capacités de désinfection.

L'élimination des virus est un peu moins efficace que celle des bactéries.

L'inconvénient de l'utilisation des lagunes vient du manque de fiabilité résultant des variations des débits et du climat. Pour améliorer la désinfection il est possible soit d'utiliser les lagunes en traitement tertiaire, soit de prévoir en sortie de lagune un filtre bactérien qui permet en plus l'élimination des algues.

¹⁰ MO = (1DCO+2 DBO₅)/3

Au niveau du traitement tertiaire, l'effluent reçu en lagunes provient d'une filière intensive. Là encore les résultats sont bons mais pas supérieurs à ceux annoncés en traitement complet. Les caractéristiques de ce traitement tertiaire sont indiquées pour trois exemples:

Description.

Site	éq.h	Traitement primaire et secondaire	Traitement tertiaire	Temps séjour	Coût MF
Porquerolles ¹¹	5 000	Aération prolongée + décanteur secondaire	3 lagunes** 12.000 m ² 2,4 m ² par éq.h***	30 J	1,35*
Palma de Majorque		Décanteurs primaires (Cl ferrique) + bassins de boues activées aérés + décanteurs secondaires	1ère lagune 100 000 m ³ réservoir tampon 2ème lagune 400 000 m ³ profondeur 5 à 7 m, aérobie (taux d'oxygène > 0,5 mg/l)	Pointe,4 à 5 J Normal 10 J	
Israël	500 000	120 ha lagunes aérées 2,4 m ² par éq.h Clarificateur (coagulation – floculation)	Lagunage naturel de 75 ha 1,5 m ² par éq.h***		

* Procédés physicochimiques : 7 à 14 MF.

** Caractéristiques des lagunes

Lagune	Type	Profondeur	Surface
n°1	Microphytes	1/1,20 m	4000 m ²
n°2	Mixte	variable (1,20 à 0,30 m)	2000 m ²
n°3	Macrophytes	0,30/0,40 m	4000 m ²

*** Le chiffre de 3 m²/ par éq.h est souvent avancé en traitement tertiaire.

Résultats

Site	DCO mg/l	DBO 5 mg/l	MES mg/l	N total mg/l	P total mg/l	Détergents mg/l	Oeufs helminthes	Coli.therm. u/100 ml
Porquerolles ^{12*}	92%	96%	86%	96%	91%	99%		10 ² à 10 ^{4*}
Palma de Majorque***		10 à 15	10 à 20				0	< 1 000
Israël,								

* En raison d'une invasion des lagunes par des lentilles d'eau et une algue tropicale, l'azola, les résultats se sont dégradés.

** dont 10² à 10³ coliformes fécaux (niveau A) contre 10³ à 10⁶ dont 10² à 10⁵ coliformes fécaux, en sortie de station de traitement primaire et secondaire (abattement moyen 10⁻²).

*** Valeurs mesurées en sortie de 2^{ème} lagune ; hors période d'irrigation, les effluents sont rejetés directement à la mer à -18 m de profondeur, en sortie de 1^{ère} lagune, par un émissaire de 2400 m de long.

Un autre inconvénient, c'est, dans les régions sèches, ensoleillées et ventées, l'importance des pertes par évaporation (ou évapotranspiration quand il s'agit de lagunes à macro- ou microphytes)

3.3.2. Marais artificiels

Les zones humides naturelles (marais, tourbières, marécages) permettent de rétablir la qualité de l'eau en particulier en ce qui concerne l'élimination de la pollution organique, la diminution des nutriments (N et P), et la réduction des microorganismes. Mais pour mieux contrôler leur fonctionnement, il est nécessaire généralement d'utiliser des marais artificiels. Il existe plusieurs types de marais artificiels suivant le mode de l'écoulement et la nature de la végétation aquatique, incluant en particulier les lagunes à macro- et microphytes. Bien conçus et bien réalisés certains systèmes permettent de répondre aux critères de l'OMS pour une irrigation sans restriction mais d'autres ne satisfont pas à ces critères. Ils permettent en plus une production de biomasse végétale et empêchent l'eutrophisation des eaux douces (Lac Victoria en Ouganda). Par contre ils créent

¹¹ Voir bibliographie

¹² Il a été de plus comparé les charges en germes témoins de contamination fécale dans différents sols irrigués à la raie ou au goutte à goutte par les eaux usées traitées avec les sols irrigués par des eaux de nappe. Il n'a pas été observé de différences significatives.

des problèmes d'odeurs et de prolifération de moustiques : aucun marais artificiel, y compris les lagunes, ne peut être utilisé dans les zones de paludisme.

En Chine il est conseillé la filière suivante :

Eaux usées municipales > Traitement primaire > Lagunage facultatif >
Système d'étangs (à usages multiples, poissons, canards) > Irrigation agricole

3.4 Stockage

Toute installation de réutilisation d'eaux usées nécessite un stockage plus ou moins important.

Pour régulariser les variations journalières du flux de sortie de la station d'épuration, le volume de la réserve sera l'équivalent de 24 à 72 heures de consommation ou plus si elle doit faire face aux risques d'interruption de l'approvisionnement en eau épurée ou aux pannes des systèmes de traitement.

Dans les régions véritablement déficitaires en ressources en eau, le stockage est intersaisonnier : il emmagasine l'eau inutilisée en période hivernale, qui sera utilisée durant l'été. Le volume du stockage est alors l'équivalent de plusieurs mois de consommation.

On distingue deux types de stockage intersaisonnier :

- la recharge de nappe,
- les réservoirs de stabilisation.

Le choix entre ces deux procédés dépend naturellement du contexte hydrogéologique. La recharge de nappe exige une nappe phréatique suffisamment perméable, qui ne soit pas déjà exploitée pour la production d'eau potable dans la zone intéressée par la recharge, et des sites propices à l'infiltration. Un contexte hydrogéologique favorable n'est pas si courant.

Au contraire, l'installation d'un réservoir de stabilisation est moins contraignante : elle demande essentiellement qu'un terrain soit disponible.

3.4.1. Recharge de nappes aquifères

Il y a deux manières de recharger les nappes aquifères : l'injection directe et les techniques de surface.

L'injection directe consiste à introduire l'eau, après qu'elle ait subi un haut degré de traitement, directement dans l'aquifère par le moyen d'un forage. Ce procédé est très coûteux, particulièrement quand il s'agit d'eaux usées.

Les techniques de surface, l'infiltration-percolation, sont par contre beaucoup plus accessibles. Ces techniques, vues précédemment, utilisent les capacités épuratrices des sols en place en combinant épuration complémentaire et recharge de nappe. Elles rendent possible l'utilisation d'eaux de qualité variée mais leur succès dépend beaucoup de la qualité des études hydrogéologiques et pédologiques préalables.

3.4.2. Réservoirs de stabilisation

Le stockage de longue durée dans des bassins constitue un véritable traitement complémentaire. Le stockage permet en effet la diminution de la demande en oxygène, des teneurs en MES, en métaux lourds, en azote et en micro-organismes. Ces diminutions sont très variables selon la qualité de l'eau d'entrée, la conception du réservoir (en particulier sa profondeur), les conditions climatiques, le temps de séjour moyen de l'eau dans le réservoir et le mode de gestion de celui-ci.

Les très nombreux réservoirs intersaisonniers réalisés en Israël, où ce procédé est le plus développé, sont profonds de 5,5 à 15 m pour limiter les pertes par évaporation et la surface

occupée. Ces réservoirs, appelés réservoirs de stabilisation, dans lesquels la charge organique appliquée ne doit pas excéder 30 à 40 kg de DBO par hectare et par an, fonctionnent un peu à la manière d'un lagunage. La partie supérieure de la masse d'eau est aérobie; la partie inférieure est anaérobie. Une partie de l'azote ammoniacal est éliminée, soit par désorption d'ammoniac gazeux dans l'atmosphère, soit par assimilation par les algues, soit par nitrification biologique en conditions aérobies. Cette élimination de l'ammoniac permet de réduire le dosage de chlore en cas de désinfection par le chlore après stockage. Une fraction du phosphore entré dans le réservoir se trouve accumulée dans les sédiments.

Les bactéries sont éliminées dans la tranche d'eau supérieure sous l'effet de la lumière et des pH élevés. L'efficacité de l'épuration, particulièrement l'élimination des coliformes fécaux et des bactériophages, diffère selon que le stockage est alimenté continûment ou qu'il est rempli dans un délai de quelques jours à quelques semaines. Dans ce deuxième cas, l'efficacité est considérablement accrue.

Des études menées en Tunisie ont montré que la qualité physico-chimique et biologique des effluents utilisés après traitement secondaire et stockage dans des étangs pour l'arrosage par aspersion de trois golfs (168 ha et 8 étangs réservoirs de 140 000 m³) s'améliorait le long des conduites d'amenée et dans les étangs en hiver (diminution des nutriments et des bactéries : sur une réduction totale de 4,4 à 5 unités logarithmiques des coliformes fécaux, l'abattement est de l'ordre de 38% pour la station, 51% le long des conduites et 11% pour les étangs).

Par contre la qualité biologique se détériore pendant la période d'irrigation parce que les conduites et les étangs fonctionnent de façon continue (temps de séjour dans les conduites : 2 jours au lieu de plusieurs semaines en hiver, dans les étangs en moyenne 7 jours au lieu de 30 jours et plus). Les eaux réutilisées ne respectent pas les critères de l'OMS. Cette filière devrait donc être modifiée en réalisant de véritables réservoirs de stabilisation alimentés alternativement et dans lesquels l'eau pourra séjourner suffisamment de temps.

4 Exemples d'applications

4.1 Application à la production d'eau potable

Pour la production d'eau potable, il faut une épuration performante des eaux usées suivie d'un traitement de potabilisation adapté à la composition de l'effluent : abattement des teneurs en molécules organiques (notamment pesticides), élimination complète des bactéries et virus, si nécessaire réduction des teneurs en métaux indésirables ou toxiques.

L'exemple généralement cité est celui de la ville de Windhoek en Namibie. Elle reçoit dans un réservoir de mélange les effluents domestiques épurés de la ville et les eaux du barrage de Gorengab. La part d'eau recyclée était de 15 % et aurait été portée à 25% en 2000.

La filière d'affinage est une combinaison de procédés classiques comportant une répétition de phases d'oxydation et d'élimination micropolluants/microorganismes : préozonation – injection de charbon actif en poudre – chloration – filtration sur sable – ozonation – filtration sur charbon actif en grains – chloration. Sa complexité est une application du principe de précaution : l'utilisation de cette filière depuis près de 30 ans a montré que l'affinage d'effluents domestiques épurés pouvait être considéré comme un complément donnant toute sécurité pour la production d'eau potable.

D'autres cas de réutilisation sont des cas de réutilisation indirecte par injection dans la nappe (Essex en Grande Bretagne, Baie de San Francisco aux USA, Wulpen en Belgique).

- Dans la région d'Essex, les eaux traitées par l'usine Water 2000 (35 000 m³/j) sont mélangées aux eaux de surface (taux de dilution maximum 37 %) et ces eaux servent à l'alimentation en eau potable avec un suivi rigoureux de la présence de virus et d'œstrogènes et des études d'impact sur l'environnement et la santé.
- En Californie, l'usine de West Basin (270 000 m³/j) est utilisée à 30% pour la recharge de la nappe pour éviter l'intrusion saline, pour l'alimentation d'un réseau d'eau traitée selon les normes du titre 22 doublant le réseau d'eau potable, pour l'alimentation de raffineries en eau de refroidissement après élimination complémentaire de l'azote.
- En Arizona et en Californie, à Scottsdale et El Segundo, des usines de dimensions modestes, Water Factory 21 (2 700 m³/j) et El Segundo (11 300 m³/j) utilisent en traitement tertiaire l'ultrafiltration suivie d'osmose inverse pour réalimenter la nappe phréatique.
- A Wulpen les eaux sont traitées par microfiltration et osmose inverse et stockées un à deux mois dans l'aquifère avant d'être utilisées pour l'alimentation en eau potable.

4.2 Application à l'irrigation

Dans de nombreux pays les eaux usées sont utilisées sans traitement, comme par exemple en Chine :

- une enquête de 1994 a montré qu'en Chine 85% des eaux usées réutilisées pour l'irrigation ne respectaient pas les prescriptions réglementaires et que 700 000 ha de terres irrigués par ces eaux sont pollués.

Les installations les plus importantes dans les pays méditerranéens sont en Israël et en Tunisie :

- le "Projet de la région de Dan" dans la zone du Grand Tel-Aviv (95 Mm³/an 22 000 ha) et le "Complexe de Kishon" à proximité de Haïfa (32 Mm³/an),
- 44 stations de traitement fournissent 130 Mm³ pour l'irrigation de 6 500 ha, principalement près de Tunis et de la côte méditerranéenne, pour l'irrigation de vergers, fourrage, cultures industrielles, céréales et de... golfs avec des possibilités pour 30 000 ha.

Les réalisations sont généralement de faible importance dans les autres pays méditerranéens et européens, en particulier en France où les ressources naturelles sont abondantes mais la réutilisation des eaux usées est souvent indispensable dans les îles où le manque d'eau est fréquent, comme c'est notamment le cas en Italie et en Espagne :

- En France un important projet d'un coût de 5,25 millions d'euros a été achevé en 1999 par l'ASA de Limagne noire. Les eaux usées de l'agglomération clermontoise (20 à 25 000 m³/j) sont utilisées pour l'irrigation d'un périmètre de 700 ha principalement en maïs après passage dans des lagunes (12 ha) pendant 13 jours. Pour éviter tout risque sanitaire, le projet a été suivi par la faculté de médecine et pharmacie : il a été réalisé des analyses d'eau tous les 15 jours ainsi qu'une suivi épidémiologique de 3 ans.

Il peut être cité un autre exemple de réutilisation des eaux pour l'irrigation : celui de l'île de Noirmoutier (Nord : 150 000 à 300 000 m³/an, 270 ha pomme de terre / Sud : 30 000 à 50 000 m³/an, 35 ha pomme de terre) où les eaux après traitement secondaire sont stockées dans des réservoirs de 220 000 m³ au Nord et 90 000 m³ au Sud qui permettent de réduire la concentration en coliformes, d'ordre 4 en sortie de station, pour la ramener au voisinage de la norme (un dépassement sur l'année).

- En Sardaigne le projet le plus important est celui de Cagliari (35 Mm³ à porter à 60 Mm³) mais de nombreux projets devraient être réalisés pour remplacer l'utilisation traditionnelle des eaux usées sans traitement.
- Aux Iles Canaries un ambitieux projet a été démarré en 1993 pour réutiliser les eaux usées de la capitale de Ténériffe, Santa Cruz, pour l'irrigation du sud de l'île (bananes). Il a nécessité une conduite de 61 km et deux réservoirs de 50 000 et 250 000 m³.

En dehors de l'Europe, il y a d'importantes installations en Australie, Arabie Saoudite et Californie :

- En Australie la " Conduite Virginie " utilise plus de la moitié des eaux usées d'Adélaïde (28 Mm³/an sur une zone de 20 000 ha) pour l'irrigation de cultures maraîchères en raison de l'insuffisance de ressources en eau et pour éviter le rejet en mer de 2 000 tonnes de nitrates chaque année. Le débit maximum journalier de 120 000 m³/j est traité par floculation, flottation avec bulles d'air et filtration puis par une désinfection après traitement. Pendant la période froide, il est envisagé de stocker les eaux dans un aquifère de médiocre qualité (salé).
- En Arabie Saoudite, l'usine de Taïf (267 000 m³/j) utilise la totalité des effluents pour l'irrigation agricole et l'arrosage des espaces verts après floculation-coagulation, filtration multicouche, charbon actif et chloration.
- En Californie, l'usine de West Basin (270 000 m³/j) est utilisée à 70% pour l'irrigation après filtration tertiaire et désinfection assurant le respect des normes du titre 22.

Deux exemples d'irrigations utilisant les eaux usées traitées en lagune peuvent être cités au Kenya et en Argentine :

- Au Kenya, les eaux usées de Nairobi (80 000 m³/j avec un maximum de 250 000 m³/j) sont traitées dans 8 séries parallèles de lagunes dont un prébassin facultatif et trois bassins de maturation assurant une réduction de 90% de la DBO et une réduction d'un facteur 6 des coliformes fécaux.
- En Argentine, à Mendoza, les eaux usées (plus de 140 000 m³/j), traitées dans 290 ha de lagunes, sont réutilisées pour l'irrigation de forêts, vignobles, vergers et autres cultures (2 000 ha).

4.3 Application à la production d'eau industrielle

Le terme de " recyclage " convient le plus souvent, car il s'agit de réutilisation d'effluents de l'usine elle-même. Il faut surtout retenir que le recyclage :

- est lié à la séparation des circuits (traitement de l'effluent en fonction de sa qualité),
- est aujourd'hui imposé pour les eaux de refroidissement (circuits fermés obligatoires), pour lesquelles il faut veiller aux risques sanitaires (légionellose),
- concerne surtout les eaux de lavage dans l'industrie agroalimentaire,
- est quasiment imposé dans le secteur du traitement de surface (depuis 1985, on ne peut utiliser plus de 8 l d'eau par m² de surface traitée).

Il est aussi évident que le recyclage est spécifique du type d'industrie concerné.

4.4 Données économiques

4.4.1. Coûts d'investissement et prix de la réutilisation de l'eau

Une étude américaine a estimé les majorations de coût (en pourcentage) de différents traitements tertiaires par rapport au coût du traitement secondaire (boues activées) :

Traitement \ Débit traité	3 800 m ³ /j	19 000 m ³ /j	38 000 m ³ /j
1 Traitement secondaire (Boues activées) Montant € ¹³	7 000 000	16 400 000	28 300 000
2 Filtration (% montant 1)	13	9	2
3 Filière d'obtention des normes titre 22 (idem)	38	28	42
4 Filtration + charbon + osmose inverse(idem)	120	200	238
5 Chaux + osmose inverse (idem)	98	146	163

Trois conclusions méritent d'être soulignées

- Le coût de la filtration diminue très rapidement avec l'augmentation de la capacité de la station.
- Le coût de la filière d'obtention des normes titre 22 est compris entre 30 et 40 % du coût du traitement secondaire et paraît optimum pour les installations de capacité moyenne.
- Le coût des filières comportant de l'osmose inverse devient rapidement prohibitif avec l'augmentation de la capacité de la station.

Cette même étude fournit les coûts d'exploitation et les coûts totaux du m³ d'eau usée (en €/m³) :

Débit traité	3 800 m ³ /j		19 000 m ³ /j		38 000 m ³ /j	
	Exploit.	Total	Exploit.	Total	Exploit.	Total
1 Traitement secondaire (Boues activées)	0,23*	0,82*	0,17	0,44	0,16	0,39
2 Trait. sec + Filtration	0,30	0,97	0,19	0,50	0,19	0,49
3 Trait. sec + Filière d'obtention des normes titre 22	0,45	1,26	0,35	0,69	0,34	0,66
4 Trait. sec + Filtration + charbon + osmose inverse	1,09	2,34	0,86	1,67	0,85	1,61
5 Trait. sec + Chaux + osmose inverse	0,92	2,05	0,74	1,39	0,70	1,31

* une autre étude aboutit à des coûts d'exploitation et total de 0,19 €/m³ et 0,63 €/m³.

De ce tableau il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- Le prix de l'eau traitée pour la réutilisation pour des usages agricoles et urbains varie dans une fourchette de 0,50 €/m³ à 1,26 €/m³. En fait il conviendrait de ne considérer que le coût marginal à l'exclusion du traitement secondaire, nécessaire dans tous les cas. Ce coût marginal varie dans la fourchette de 0,06 €/m³ (moins de 15% du prix de l'eau traitée sans réutilisation) à 0,44 €/m³ (moins de 55% du prix de l'eau traitée sans réutilisation).
- Le coût d'exploitation se réduit fortement lorsqu'on passe d'une station de faible capacité (moins de 5 000 m³/j) à une station de capacité moyenne (plus de 20 000 m³/j) mais au-delà les coûts ne baissent plus que faiblement.
- Le prix de l'eau après traitement tertiaire permettant les usages agricoles et urbains reste acceptable (inférieur au prix de l'assainissement dans le cas d'une station de faible capacité) à condition d'utiliser une station de moyenne capacité au moins et de ne pas envisager la production d'eau de qualité potable nécessitant l'osmose inverse.

Pour la Chine les valeurs pour une filière filtration et désinfection au chlore (analogue à la filière 2) sont voisines :

- supplément de coût d'exploitation de 0,035 €¹⁴/m³ à 0,055 €/m³ au lieu de 0,02 €/m³ à 0,07 €/m³.

- supplément de coût total 0,08 €/m³ au lieu de 0,06 €/m³ à 0,15 €/m³.

En Italie le Polytechnique de Milan a procédé à une étude très détaillée du coût d'exploitation de la filière filtration et désinfection dans diverses hypothèses de désinfection pour une station de 200 000 éq/h :

¹³ 1€ = 0,88 US\$

¹⁴ 1€ = 7,33 yuan

Filières	Filtration + FeCl₃ ClONa	Filtration + FeCl₃ UV	Filtration + FeCl₃ acide peracétique)	Filtration + FeCl₃ O₃
Normes coliformes totaux				
2,2/100ml (titre 22)	0,026 €/m ³	0,026 €/m ³		0,084 €/m ³
23/100ml (titre 22 avec restrictions)	0,024 €/m ³	0,024 €/m ³	0,090 €/m ³	0,058 €/m ³
100/100ml	0,022 €/m ³	0,022 €/m ³	0,059 €/m ³	0,046 €/m ³
1000/100ml (OMS)	0,020 €/m ³	0,020 €/m ³	0,038 €/m ³	0,038 €/m ³

La désinfection aux UV et à ClONa sont les procédés les moins chers et l'augmentation de coût pour passer de la norme OMS à la norme plus exigeante du titre 22 est de 30%. Les prix obtenus sont identiques à ceux obtenus dans l'étude US : 0,02 €/m³ pour une filière filtration - désinfection et un débit de 19 800 m³/j analogues. L'ozone n'a d'intérêt que s'il y a d'autres objectifs comme la destruction de composés organiques tels ceux utilisés en teinturerie.

Ces coûts sont à comparer au prix de vente à Noirmoutier en France d'eau réutilisée pour l'irrigation :

- réutilisation des eaux usées : 0,23 à 0,30 €/m³
- eau potable usage agricole : 1,54 €/m³ (usage domestique : 4,57 €/m³ dont 2,21 €/m³ pour l'assainissement)

Il faut toutefois ajouter à ces coûts, le coût du réseau de distribution qui peut représenter jusqu'à 70% du coût total dans des conditions particulières. Quelques valeurs peuvent être fournies à titre d'exemple :

- Arabie Saoudite (Joubail) : 0,07 €/m³.
- Israël (Dan et Jérusalem) : 0,16 €/m³ et 41 €/m³. (!)

4.4.2. Solutions alternatives

D'autres solutions peuvent être envisagées pour satisfaire les besoins en eau dans les pays déficitaires :

- Le dessalement des eaux saumâtres et marines. Les pays de la péninsule arabe font appel à de grandes et de nombreuses petites installations pour satisfaire plus de la moitié de leurs besoins (près de 95% au Koweït). Les coûts sont très élevés en raison de la salinité de la Mer Rouge, en particulier pour les petites installations : 2,8 €/m³ à 11,5 €/m³. L'utilisation de l'osmose inverse permet d'obtenir en Israël des coûts moins élevés : 0,80 €/m³ à 1,25 €/m³, comparables aux coûts de réutilisation des eaux usées qui sont, nous l'avons vu, dans une fourchette comprise entre 0,50 €/m³ et 1,26 €/m³ aux USA.
- Des transferts importants ont été envisagés au Moyen Orient mais avec peu de chances de réalisation en raison du coût et des risques politiques. De même en Europe le transfert du Rhône à Barcelone suscite des critiques en raison de son coût et de la prise en considération insuffisante de solutions alternatives, dont la réutilisation des eaux usées. Des chiffres du coût d'importation d'eau ont été proposés : 2,75 €/m³ (Arabie Saoudite), 0,40 €/m³ (Californie).

Conclusions

C'est l'acceptation psychologique par le public de l'utilisation des eaux usées qui constitue la principale barrière à une utilisation plus fréquente de cette ressource malgré les menaces de pénurie d'eau dans le monde. Certains pensent qu'il serait indispensable de distinguer la réutilisation des eaux usées pour l'alimentation en eau potable, fortement rejetée malgré toutes les garanties apportées, et la réutilisation pour les autres usages ne nécessitant pas d'eau potable qui serait plus facilement admise. D'autres pensent que ce

rejet de la réutilisation des eaux usées est très général et qu'un changement des mentalités sera difficile à obtenir. Mais il faut souligner que des enquêtes ont montré que le grand public, à plus de 50%, confondant stations de traitement des eaux usées et stations de potabilisation, est persuadé que les eaux distribuées en ville proviennent du recyclage des eaux usées et il l'admet !

1. Pour la production d'eau potable, la réutilisation d'effluents domestiques affinés est possible mais exceptionnelle comme le montre l'expérience de Windhoek. D'un point de vue général, la chaîne de traitement est la combinaison d'une filière d'épuration des eaux usées d'une part et d'une filière d'affinage de l'effluent épuré d'autre part.

2. Par contre les autres utilisations sont beaucoup plus fréquentes :
 - a - soit en utilisation directe
 - comme eau urbaine dans des villes d'Espagne, du Japon, des USA,
 - pour l'irrigation en Espagne, Israël, Jordanie, Egypte, Tunisie, Maroc, Afrique du Sud, Zimbabwe,

 - b - soit en utilisation indirecte
 - en recharge de nappe à grande échelle aux USA, en Belgique, au Royaume-Uni, en Afrique du Sud,
 - comme objectif d'un rejet zéro dans les eaux de surface aux USA (Floride ; pour garantir le rejet 0 il a été prévu des puits profonds d'injection), dans certaines îles en France (Mont Saint-Michel, Noirmoutier).

Annexe Utilisation des membranes

Particules	Ions		Molécules		Macromolécules		Micro particules		Macro particules	
Observation	Microscope électronique				Microscope optique				Visible à l'œil nu	
Micron		10 ⁻³	10 ⁻²	0,1	1	10	100			
Angström	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶			
Masse mol. approx.	100	200	1 000	10 000	20 000	100 000	500 000			
Rétention		Sels en solution		Virus			Giarda Cyst		Sable de plage	
		Ions métalliques		Protéines (Albumine)		Bactéries		Pollen		
				Endotoxines Pyrogènes			Levures			
Procédé de séparation		Osmose inverse		Ultrafiltration			Filtration particulaire classique, sable, tamis			
			Nano filtration			Microfiltration				

Bibliographie

Principaux documents utilisés pour l'établissement de la note

1. **1st World Water Congress of the International Water Association (IWA) 3rd International Symposium on Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse.** Conference pre-print Book 8. 3-7 July 2000 Paris. Diverses communications:
2. **Document technique FNDAE N° 11. Utilisation des eaux épurées pour l'irrigation** (y compris golfs et espaces verts urbains). J.A. Faby, OIEau et François Brissaud (université de Montpellier) mai 1988
3. **Société du canal de Provence et d'aménagement de la région provençale. SCP Ingénierie Développement.** Diverses communications :
 - *La valorisation agricole des eaux usées sur l'île de Porquerolles. Bilan et enseignements de 15 ans de gestion.* Marcel Cadillon, SCP et Jean-Paul Roger, Parc national de Port Cros, Conservatoire botanique. Hydrotop avril 1996.
 - *L'irrigation forestière avec des eaux usées en situation de maquis ou de garrigue. Bilan et perspectives.* Marcel Cadillon, SCP et Lidia Lancar, SCP. Rencontres de l'Agence régionale pour l'environnement octobre 1996.
 - *Le stockage et l'irrigation avec des eaux usées : un procédé de traitement et de valorisation.* Marcel Cadillon, SCP et Lidia Lancar, SCP. Rencontres de l'Agence régionale pour l'environnement octobre 1996.
4. **Agence Régionale pour l'Environnement Marseille 3^{ème} rencontre (1991) Technologies pour le traitement et la réutilisation des eaux usées dans le bassin méditerranéen.** Soulier M. (Verseau), Tremea Lancar L. (SCP) Expériences israéliennes : " Dan Project " et " Kishon Irrigation Project "
5. **Hydroplus,**
 - **octobre 97, p. 21 et avril 98, p. 35** *Expérience pionnière de réutilisation directe dans le réseau d'eau potable de Windhoek (Namibie)*
 - **avril 98, p. 35** : *Production indirecte d'eau potable avec stockage intermédiaire des eaux dans des nappes, des lacs ou des réservoirs artificiels (de 38 000 à 145 000 m³/j) aux Etats-Unis (Californie, Texas, Floride) en Angleterre (Société Essex-Suffolk)*
 - **avril 98, ensemble de projets espagnols d'irrigation**

Caractéristiques	Vittoria-Gasteiz	Benalmadena /Costa del Sol	Almeria	Villaseca- Salou	Costa Brava
Mode d'épuration	Station Norme titre 22	Filtre membrane Désinfection O ³	Filtre sable ozonation	Station Norme titre 22	Filtre membrane Désinfection UV
Capacité (m ³ /j)	35 000	?	30 000	5000 à 17 000	15 000
Objet	Irrigation 4000 ha	Irrigation	Irrigation 7000 h	Irrigation	Irrigation + soutien débit
Nature	Maraîchage	Parcours golf	Serres	Espace vert	Parcours golf

- **juillet-août 98, Irrigation de cultures maraîchères et vignes à Mendoza (Argentine) à partir d'eaux usées traitées par lagunage**

1. **Environnement Magazine** n°1576 d'avril 99 (p.42 à 47), *Production d'eau industrielle*

2. Rapports de mission G.Monchalin :

- *Réunion (16 au 2 février 1996) projet pilote de l'Etang Salé et juin 95, projet pilote de la commune du Port.*
- *France + colloque Hydrotop 96 (11 au 25 avril 1996),*
- *France Malte Majorque (13 au 28 juillet 1996) avec données sur les réalisations israéliennes*

Autres documents

1. **Organisation Mondiale de la Santé.** Genève. **Guide pour l'utilisation sans risques des eaux résiduaires et des excréta en agriculture et en aquaculture.** Mara D., Cairncross S. et alien. 1991. 205 p. (contexte tropical).
2. **B.R.G.M.** Orléans. **La réutilisation des eaux usées.** Valiron F. 1983. 208 p (climats tempérés).
3. **AFEID Antony Journées d'études nationales Angoulême Valorisation agricole des eaux résiduaires de l'industrie agroalimentaire et des collectivités 1982.**
4. **Réutilisation des eaux usées par l'irrigation. Méthodologie. Réalisations en France.** Rodier C., Brissaud F. 1989.
5. **Conseil supérieur d'hygiène publique de France.** Paris **Recommandations sanitaires concernant l'utilisation des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation des cultures et des espaces verts.** 1991.
6. **EPA et USAID Washington Guidelines for water reuse.** 1992 247 p.