



HAL
open science

La réutilisation des eaux usées: solution d'avenir pour la gestion de la ressource en eau ?

Christophe Michel, Christophe Schramm

► To cite this version:

Christophe Michel, Christophe Schramm. La réutilisation des eaux usées: solution d'avenir pour la gestion de la ressource en eau ?. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2007. hal-01785095

HAL Id: hal-01785095

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01785095>

Submitted on 4 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**La réutilisation des eaux usées :
Solution d'avenir pour la gestion
de la ressource en eau ?**

IE 1 [564]

MINES ParisTech
BIBLIOTHÈQUE
60, boulevard St-Michel
75272 PARIS CEDEX 06

Mémoire d'Ingénieurs-Elèves du Corps des Mines

Christophe Michel, christophe.michel@mines.org
Christophe Schramm, christophe.schramm@mines.org

c PO 2006

Août 2007

Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	2
REMERCIEMENTS	6
ABREVIATIONS	7
INTRODUCTION.....	11
I) USAGES ET TECHNOLOGIES.....	15
1. Usages urbains	15
a) Projets de la ville de Sydney.....	15
b) Sydney Water – Projet Rouse Hill.....	17
c) Parc Olympique de Sydney	18
d) Pimpama-Coomera à Gold Coast City, Queensland	18
e) Double réseau de Mawson Lakes à Adélaïde	21
2. Usages industriels	23
a) Projets en Australie.....	23
b) Projets au Mexique	26
c) Réutilisation des eaux de process chez Arcelor-Mittal à Dunkerque	29
3. Recharge de nappe.....	30
a) Mexico (Vallée El Mezquital)	30
b) Projets en Australie.....	31
c) Enjeux de l’ASR et de l’ASTR.....	32
4. La réutilisation potable	34
5. Usages agricoles	35
a) Réutilisations horticole et viticole à Adélaïde	35
b) Réutilisation agricole à Clermont-Ferrand	37
c) Projet de réutilisation agricole à Grau du Roi	38
d) Projet pilote à Drarga, Maroc	39
6. Usages environnementaux	40
a) Projet de remplacement des débits à Sydney (Sydney Water)	40
b) Projet de soutien d’étéage et de substitution potable à Barcelone, Espagne	40
c) Projet de soutien d’étéage et d’irrigation à Vitoria (Espagne)	41

7. Tendances technologiques et commerciales	42
II) RISQUES.....	43
1. Risques sanitaires	44
a) Microorganismes pathogènes	44
b) Substances chimiques	51
c) Pollutions « émergentes »	52
2. Risques environnementaux.....	54
3. Facteurs organisationnels et humains.....	57
III) LEGISLATION.....	59
1. OMS	59
a) Le cadre conceptuel « de Stockholm »	59
b) Une nouvelle approche	60
2. Australie	62
a) Evaluation du système	62
b) Les mesures préventives de gestion.....	63
c) Concentrations limites et diminution du risque.....	64
d) Situation dans l'état du Queensland	65
3. Mexique	66
4. Maroc.....	68
5. USA : Californie.....	69
6. Espagne.....	71
7. France	73
a) La réglementation de 1991	73
b) Le projet de l'année 2000	73
c) Quel avenir pour la réutilisation en France ?.....	75
8. Comparaison des normes des pays développés et en développement.....	77
9. Droit d'exploitation et de propriété des eaux usées.....	80
a) Australie.....	80
b) Mexique	81
IV) ECONOMIE	83
1. Externalités, bénéfiques et coûts indirects	83
a) Un peu de théorie.....	83
b) Non eutrophisation / non pollution de l'environnement.....	85
c) Agriculture et nutriments des eaux usées	86
d) Sols agricoles et eaux usées.....	87

e)	Réutilisation industrielle.....	87
f)	Bénéfices sanitaires	88
g)	Tourisme.....	88
h)	Usages « décoratifs » et récréatifs de l'eau régénérée.....	88
i)	Externalités non marchandes	89
j)	Pertinence des externalités en fonction du niveau de développement socio-économique et environnemental.....	91
2.	Eau virtuelle, eau agricole : la valeur ajoutée de l'eau	93
a)	Australie.....	94
b)	Mexique.....	94
c)	France	94
3.	Contextes des secteurs de l'eau en Australie et au Mexique.....	96
a)	Situation du secteur de l'eau australien	96
b)	Situation du secteur de l'eau mexicain	97
4.	Les facteurs déterminants du choix de réutilisation dans les projets étudiés	100
a)	Rareté.....	101
b)	Règlementation et amélioration environnementale	105
c)	Proximité du lieu de réutilisation.....	107
d)	Comparaisons de coûts	108
e)	Subventions où pourquoi tout projet de réutilisation est combinaison d'économie et de politique	110
f)	Volonté « écologique ».....	113
5.	Gestion du risque.....	114
a)	Analyse des risques	114
b)	Partage des risques.....	114
c)	Portefeuille de ressources	115
d)	Evaluation des risques financiers	117
6.	Exemples de coûts de projets.....	118
a)	Rouse Hill.....	118
b)	Sydney Olympic Park.....	119
c)	Western Corridor	119
d)	Mawson Lakes.....	120
e)	Salisbury (recharge de nappe)	122
f)	Willunga	123
g)	Salina Cruz	123
h)	San Luis Potosí	125
V)	DEVELOPPEMENT DURABLE.....	127
1.	Comparaison des alternatives de traitement.....	128
a)	Consommation énergétique	128
a)	Impact environnemental et social	130
b)	Politiques publiques.....	132
2.	Méthodes d'évaluation et d'aide à la décision.....	133

a) Evaluation des critères de durabilité.....	133
b) Reporting « Triple Bottom Line » et décisions multicritères	136
3. Développement durable et participation	140
CONCLUSION	142
ANNEXES	144
1. Critères australiens de potabilité	144
2. Détail des clients potentiels du projet « Western Corridor »	145
3. Personnes rencontrées ou interrogées.....	146
BIBLIOGRAPHIE.....	150

Remerciements

Les auteurs de ce mémoire tiennent d'abord à remercier François ENGEL, professeur à l'Ecole des Mines de Paris et pilote de ce travail, pour ses conseils avisés tout au long de l'année 2006/2007, pour ses commentaires constructifs concernant les différents documents produits et enfin pour sa relecture très attentive de la version finale de ce mémoire.

Des remerciements particuliers vont au groupe SUEZ, et en particulier à Jacques LABRE de Suez Environnement et Thierry MALLET de Degrémont, qui ont ouvert les portes du groupe et permis au binôme de mener leur étude dans deux pays expérimentant actuellement la réutilisation des eaux usées que sont l'Australie et le Mexique.

Le binôme souhaite aussi remercier tous ses interlocuteurs qui ont bien voulu lui accorder leur temps pour échanger avec lui sur le sujet et qui ont ainsi enrichi ce mémoire par leur expérience et leur vision. Il est reconnaissant de l'accueil tout particulièrement chaleureux qu'il a reçu auprès de Bill CAPATI (Gold Coast Water, Australie), Erik LEZAMA (Degrémont Salina Cruz, Mexique), Terry LOOS (Australian Water Association), Carlos MENDEZ (Degrémont San Luis Potosí, Mexique), Eric PAILLAS (Degrémont Mexique), Stéphanie RINCK-PFEIFFER (United Water Adelaïde, Australie) et Marc SIMON (Degrémont Australie).

Abréviations

APT	Advanced Primary Treatment (Traitement Primaire Avancé)
ASR	Aquifer Recharge & Recovery (Recharge de Nappe puis Extraction)
ASTR	Aquifer Recharge, Transfer and Recovery (Recharge de Nappe, Transfert puis Extraction)
ATK (TKN en anglais)	Azote Total Kjeldahl
AUD	Dollar australien
BOT	Build Operate Transfer (Construction, Gestion puis Transfert)
BP	British Petroleum
C	Concentration
CAP	Capacité A Payer
CAPEX	Capital Expenses
CAR	Capacité A Recevoir
CEA	Commission d'Eau de l'Etat (Mexique)
CEE	Communauté Economique Européenne
CFE	Comisión Federal de Electricidad (Commission Fédérale d'Electricité)
CFU	Colonie Formant Unité
Cl	Chlore
cm	centimètre
CNA	Comisión Nacional de Agua (Commission Nationale de l'Eau, Mexique)
ct	centime
DAF-F	Dissolved Air Flotation Filtration (Flottation-Filtration Aérée)
DALY	Disability-Adjusted Life Years

DBO (BOD en anglais)	Demande Biologique en Oxygène
°C	degré Celsius
DCO (COD en anglais)	Demande Chimique en Oxygène
€	euro
EDC	Endocrine disrupting compounds (Disrupteur Endocrinien)
EE	Empreinte Environnementale
EH	Equivalent Habitant
EPU	Ecoulements Pluviaux Urbains
FAO	Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation)
g	gramme
GCW	Gold Coast Water
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GW	GigaWatt
h	heure
ha	hectare
j	jour
km	kilomètre
kW	kiloWatt
l	litre
LCC	Life-Cycle Costing
log	logarithme (décimal)
m	mètre
M	Million
m ²	mètre-carré

m ³	mètre-cube
MBR	Membrane Bio-Reactor (BioRéacteur à Membrane)
MES (SS ou TSS en anglais)	Matières En Suspension
MF	MicroFiltration / Million de Francs (français)
mg	milligramme
ml	millilitre
µm	micromètre
MM	milliard
µS	micro-siemens
MXN	Peso mexicain
Na	sodium
Nb	nombre
NMP	Most Probable Number (Nombre le Plus Probable)
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Unité de Turbidité Néphélobométrique)
OFWAT	Office of Water Services
OI (RO en anglais)	Reverse Osmosis (Osmose Inverse)
OMS (WHO en anglais)	Organisation Mondiale de la Santé
OPEX	Operational Expenses
PVD	Pays en Voie de Développement
RWTP	Recycled Water Treatment Plant (Station de Régénération des Eaux Usées)
SA	Water South Australia Water
SPA	Substances Pharmaceutiques Actives
STA	Station de Traitement Avancé des eaux usées
STD (TDS en anglais)	Solides Totaux Dissous

STEP (WWTP en anglais)	STation d'EPuration
SW	Sydney Water
T	Tonne
TBL	Triple Bottom Line
TP-P	Phosphore Total
UE	Union Européenne
UF	UltraFiltration
US\$ ou USD	dollar américain
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultra-Violet
VAN	Valeur Actuelle Nette
WC	Western Corridor

Introduction

Tour du monde de la réutilisation des eaux usées

Si la réutilisation des eaux usées traitées reçoit aujourd'hui une attention médiatique accrue dans plusieurs pays du monde, il apparaît important néanmoins de rappeler que cette technique a des origines relativement anciennes.

Ainsi, à partir de la seconde moitié du XIX^{ème} et pendant près d'un siècle, les effluents urbains parisiens non traités sont épanchés via un émissaire unique dans les Yvelines et le Val d'Oise sur près de 2.500ha¹, où les maraîchers apprécient l'apport gratuit de matières organiques aux sols sableux de Pierrelaye Bessancourt. En même temps, les « officiers des basses œuvres » collectent les matières fécales et les revendent de façon fort lucrative aux cultures en bordure de la ville de Paris (Fourmeau, 2002).

Un siècle plus tard, cette technique éprouvée est toujours à l'œuvre dans d'autres endroits du globe. Près de 50m³/sec d'effluents non traités irriguent les champs de la Vallée El Mezquital au Nord de Mexico (Jimenez, 2005), et de façon plus générale on estime que près de 10% des surfaces irriguées dans le monde le sont avec des effluents non traités (Jimenez, 2006a).

En France, l'épuration collective a connu son essor à partir de la première grande Loi sur l'Eau de 1964 qui crée les Agences de Bassin (Giblin, 2003). Mais la réutilisation des effluents, bien que plus discrète et « non planifiée », est toujours présente : ce sont en effet les effluents traités d'une ville en amont d'une rivière ou d'un fleuve, et mélangés à des eaux brutes, que traitera une ville plus en aval pour produire de l'eau potable. Et l'on sait qu'en période d'étiage, au moins 50% du débit de la Seine à Paris est constitué d'effluents assainis (Fourmeau, 2002).

Les préoccupations ont changé depuis cent ans dans l'hexagone. Désormais, ce sont les antibiotiques et les oestrogènes rejetés dans la Seine qui absorbent les esprits. On entend dire que ces derniers seraient la cause de la féminisation de près de 40% des gardons mâles du fleuve français². Le thème du développement durable trouve aussi désormais un écho important auprès de la population et de ses élus, et semble promouvoir des solutions « écologiques » comme la collecte des eaux pluviales – dont on peut questionner la rationalité économique – à l'intérieur même de la maison, au grand dam de la Direction Générale de la Santé (JDLE, 2007a). La réutilisation des eaux usées, qui s'inscrit dans la droite ligne de la limitation de l'empreinte écologique de l'Homme sur son environnement, et de l'adéquation de la qualité de l'eau au besoin, bénéficie de cette adhésion du public au concept du développement durable.

Aujourd'hui toujours, mais à l'autre extrémité du globe, le changement climatique qui touche très durement l'Australie lui a imposé une politique très rigoureuse de gestion de la ressource, au sein de laquelle la réutilisation des eaux usées occupe une place de choix, et fait de ce pays un des plus avancés désormais au monde dans l'expérimentation généralisée de la réutilisation

¹ Source : <http://verts95.ouvaton.org/EauxUsees.htm>

² Source : http://www.acme-eau.org/Le-medicament.-du-malade-a-l-eau-potable_a1040.html

des eaux usées. Ce ne sont en effet pas moins de 20 à 30% des volumes consommés sur le continent le plus sec du monde qui seront des effluents traités d'ici 2012 (United Water, 2007). Plus proche de nous, l'Espagne rend, à travers son plan A.G.U.A., la réutilisation des eaux usées obligatoires pour les quelques 300 cours de golfs du territoire³. La France n'est pas non plus à l'abri de graves sécheresses, comme l'ont montré les années 2003 et 2005. En 2005, pas moins de 58 départements étaient limités dans certains usages de l'eau par arrêté préfectoral durant l'été.

Enfin, la réutilisation des eaux usées traitées fait émerger de nouveaux modèles économiques dans les pays en voie de développement. Au Maroc par exemple, où près de 70% des stations d'épuration, vues comme simples centres de coûts, tombent en désuétude, un projet innovant de réutilisation des eaux usées à Drarga montre que la nouvelle perception de la station en tant que centre de profit permet de rendre le modèle économique viable (Kerby). Au Mexique, l'industriel PEMEX, subvient entièrement à l'épuration de la ville de Salina Cruz, en échange d'effluents urbains qui sont traités puis utilisés par sa raffinerie.

C'est ce foisonnement d'actualité et de problématiques intéressantes que les auteurs ont tenté de traiter dans les chapitres suivants.

Plan et Résumé de l'étude

La présente étude recense tout d'abord les **différents types d'usages** possibles à partir d'effluents urbains traités, et cite les **choix technologiques** effectués pour des projets spécifiques. La collecte des eaux pluviales, bien que non centrale dans cette étude, est abordée à travers quelques exemples. La réutilisation agricole est un des rares usages émergents en France pour le moment, à travers quelques projets d'irrigation de golfs, outre le projet d'envergure mené il y a une quinzaine d'années à Clermont-Ferrand. Des projets de réutilisation industrielle sont analysés en Australie, et au Mexique (où l'industriel constitue, peut-être plus encore que dans d'autres pays, une demande plus solvable pour sa consommation d'eau). Un projet de double réseau à Sydney montre que la proportion d'eau potable peut diminuer jusqu'à 1,5% de la consommation totale. Des projets de recharge directe de nappe voient le jour en Australie, et conjuguent des performances intéressantes de traitement (E.coli par exemple) à la résolution du problème de la saisonnalité de l'irrigation. L'infiltration de nappe par percolation à Mexico donne aussi des résultats très encourageants : l'eau résurgente est potable (et satisfait le test de 246 composés organiques volatils) modulo une désinfection et un dessalement léger, la filtration du sol ayant une efficacité similaire à un traitement secondaire, mais augmentant la salinité. La réutilisation potable indirecte, bien que très débattue en Australie, est déjà très souvent une réalité pour l'Europe et ses longs fleuves qui recueillent souvent les effluents traités d'une ville en amont pour alimenter en eaux brutes un ville un peu plus en aval. Cette situation peut être vue comme paradoxale, puisque l'on peut percevoir l'Australie, depuis la France tout du moins, comme très avancée dans le domaine de la réutilisation. Après quelques projets épars, Sydney Water a confié au binôme souhaiter conserver un unique type de traitement avant réutilisation (microfiltration et désinfection), tout traitement supplémentaire étant à la charge du client. D'autre part, la moitié des projets étudiés dans ce mémoire font appel à un traitement membranaire. Une

³ Exemple de source : <http://www.latinreporters.com/espagnesoc10082005.html>

rigidification de la législation incitera vraisemblablement les opérateurs à avoir de plus en plus souvent recours à des membranes toujours plus fines dans le futur.

Le mémoire fait ensuite le point sur les **risques associés à la réutilisation** des eaux usées. Ceux-ci peuvent être regroupés en trois catégories, sanitaire, environnementale et organisationnelle – cette dernière revêtant une importance toute particulière dans le cas d’usages sensibles comme la réutilisation potable. Dans les pays en voie de développement, l’helminthiasis⁴ est un problème de santé publique majeur : dans la vallée de la Tula par exemple près de Mexico, où les eaux usées non traitées sont utilisées pour irriguer les cultures, le taux d’helminthiasis est seize fois supérieur chez les enfants que dans des régions aux conditions socio-économiques similaires - les agriculteurs doivent donc arbitrer entre productivité accrue (due aux nutriments contenus dans les eaux usées), et santé de leur progéniture. Les concentrations de pathogènes diffèrent notablement entre pays développés et pays en voie de développement et montrent la nécessité de ne pas avoir d’approche unique pour des pays au contextes différents.

Au-delà des risques « classiques », les pollutions émergentes, comme les perturbateurs endocriniens, retiennent désormais l’attention, et mettent en avant un besoin de recherche supplémentaire.

Le mémoire compare les **réponses législatives et réglementaires** de différents pays sur lesquels les auteurs se sont penchés, et tout particulièrement celles de l’Australie, du Mexique et de la France. Les législations de l’Organisation Mondiale de la Santé, du Maroc et de l’Espagne sont aussi abordées, et les enjeux économiques et d’unification internationale sont évoqués. L’OMS a évolué d’une approche où le risque supplémentaire lié à la réutilisation des eaux usées et porté par la population ne devait pas être détectable (1989), à une évaluation quantitative des risques microbiologiques (2006) où un seuil de risque acceptable par une communauté est défini. Au-delà du traitement lui-même, des mesures telles que la mise en quarantaine de légumes arrosés par des eaux usées traitées accordent des « crédits » qui permettent de compenser un traitement moins extensif. La multiplication de barrières de sécurité est observée dans la législation australienne. L’approche mexicaine qui lie seuil de concentration et coût de la technologie utilisée est décrite, et les normes américaines et OMS sont comparées économiquement – en termes de coût par maladie prévenue chaque année, mettant en évidence la différence de valeur accordée à la prévention de la maladie en fonction du développement socio-économique d’un pays. Les questions de propriété des effluents et de l’accès au réseau d’égout par un tiers sont abordées.

Les auteurs analysent aussi **l’économie des projets de réutilisation**. Quelques bases théoriques sont rappelées, pour évoquer ensuite les incitations concrètes des opérateurs rencontrés. Les externalités et bénéfices indirects dus à des projets de réutilisation des eaux usées sont nombreux et peuvent être appréhendés financièrement. Cependant, d’une part l’évaluation de telles externalités repose en grande partie sur la quantification de la disposition à payer des bénéficiaires, qui ne reflète pas nécessairement la réelle valeur du projet pour ceux-ci lorsque leurs moyens sont limités, et d’autre part les normes environnementales de plus en plus contraignantes de pays ou zones comme l’Union Européenne rendent les améliorations gagnées par la réutilisation des eaux usées moins sensibles. Pour l’U.E. en particulier, la potabilisation de l’eau et l’épuration se complexifient : seulement 83% des stations d’épuration françaises dimensionnées pour plus de 2.000 équivalents habitants étaient aux normes européennes en 2006, ce qui montre qu’il y a déjà

⁴ Qui sera détaillée dans la partie II.1 : Risques sanitaires

une marge de progrès environnemental à respecter les normes établies, mais d'un autre côté des critères plus sélectifs pour l'eau potable peuvent rendre une eau usée traitée pour des usages moins nobles plus intéressante économiquement. Le binôme a également étudié comment les contextes nationaux de l'Australie et du Mexique pouvaient favoriser l'émergence de projets de réutilisation des eaux usées. En Australie, un prix bas de l'eau, n'incitant pas à un recours à une eau réutilisée trop chère, s'oppose à une initiative nationale promouvant la réutilisation. Mais la rareté de l'eau sur le continent, des normes environnementales strictes et des subventions incitant des projets innovants encouragent la technique. D'un point de vue général, **ces dernières subventions peuvent d'ailleurs fausser l'économie des projets de réutilisation, qui se trouve ainsi souvent entachée de considérations politiques.** Au Mexique, où l'épuration est beaucoup moins répandue, le secteur sous-financé et la régulation moins stricte, des projets de réutilisation naissent grâce à des taxes de prélèvement dans la ressource naturelle très incitatives. Les coûts et bénéfices de projets concrets sont détaillés, montrant combien il est difficile, à partir de calculs spécifiques, de faire des généralisations pour l'ensemble des projets de réutilisation : ce sont ainsi non seulement la qualité de l'eau régénérée, mais aussi la distance entre le consommateur de cette eau de son point de production (la station d'épuration), les coûts de mise à niveau environnemental évités ou les investissements déjà engagés, et les subventions, qui modifient l'équilibre économique d'un tel projet. **Au final, un projet de réutilisation adopté n'est pas nécessairement le moins cher dans l'absolu, mais son choix tient compte de montages économiques avantageux et de la situation de départ en particulier : c'est une des idées forces de ce mémoire.** La gestion des risques, financiers pour les entrepreneurs de projets de réutilisation, et d'approvisionnement en eau pour des collectivités subissant les effets du changement climatique, est aussi un paramètre crucial pour la réutilisation des eaux usées, comme la description du cas australien le montrera. Enfin, l'émergence de l'initiative privée pour la réutilisation a été observée dans les deux pays visités par le binôme, et est par exemple illustrée par le récent régime proposé par le législateur de Sydney, qui accorde un droit « opposable » – Sydney Water y fut par exemple contraint par le législateur IPART - permettant aux entités qui souhaiteraient fournir un service d'eau de négocier « de bonne foi » avec le propriétaire de l'infrastructure l'accès à ses effluents.

Il apparaît alors que les **aspects de développement durable**, quantifiables économiquement ou non, doivent aussi être pris en compte. Ils seront vraisemblablement le moteur principal de projets de réutilisation en France. La réutilisation des eaux usées a en effet des impacts beaucoup moins prononcés sur le paysage que des ouvrages structurants comme les barrages, et est largement moins consommatrice d'énergie que le dessalement d'eau de mer ou saumâtre. Elle est par conséquent assez peu impactée par une augmentation du prix de la tonne de CO₂ à venir au sein des pays signataires du Protocole de Kyoto. La dernière partie de cette étude s'appuie aussi sur les méthodologies d'évaluation multicritères des projets, dont celle, australienne, dite de la « Triple Bottom Line », et décrit les modes de participation du public au choix effectués, afin de s'assurer de son adhésion.

D) Usages et technologies

1. Usages urbains

Les usages urbains d'eau régénérée incluent **l'irrigation urbaine** (parcs, jardins publics, espaces verts hôteliers), d'autres **usages récréatifs** ou esthétiques (tels que les fontaines, les plans d'eau, les cours d'eau ou le lavage des voies urbaines), et les **double réseaux domestiques**⁵ qui permettent le recyclage d'eaux usées à des fins non potables comme le jardinage, les chasses d'eau, voire même les machines à laver le linge.

Un traitement suffisant des **eaux usées urbaines** permet de les rendre compatibles avec ces usages. Cependant, des municipalités, telles que celle de Sydney, font aussi le choix de l'approvisionnement en **eaux pluviales** (provenant de toits de bâtiments) ou en **eaux d'écoulement pluvial urbain**⁶ qui ruissellent sur des voies carrossables, entraînant ainsi des polluants comme des produits chimiques ou des bactéries. Ces écoulements urbains dimensionnent généralement les stations d'épurations par leur très fort débit concentré sur une courte durée.

La ville de Sydney distingue les **eaux d'écoulement ayant ruisselé sur les routes**, et qui comptent parmi les plus polluées des sources alternatives d'eau de la ville (car chargées en particulier en essence, caoutchouc, poussière venant des freins automobiles, et en substances fécales⁷), de **celles qui n'ont circulé que sur des surfaces plus propres** (désormais dénotées EPU pour Écoulements Pluviaux Urbains) telles que le sol durci des parcs qui nécessitent beaucoup moins de traitement (un passage à travers un tamis suffirait avant irrigation, ainsi que peut-être un traitement contre quelques bactéries ou champignons comme la *Phytophthora* ou le *Fusarium*). Un tableau donnant la qualité de ces dernières est donné en Annexe I (et doit être lu en gardant en tête que la qualité des eaux pluviales est variable).

a) Projets de la ville de Sydney⁸

La ville a l'objectif ambitieux de ne pas augmenter les consommations d'eau conventionnelle de la région gouvernementale de Sydney d'ici 2015. Cette stratégie se décline en deux sous objectifs :

- Remplacer les ressources conventionnelles en eau par la récupération d'eaux pluviales, et d'EPU ;
- D'améliorer la qualité et de réduire la quantité des EPU déversés dans l'océan.

La ville ne se charge pas elle-même de conduire les initiatives de réutilisation des eaux usées, qui sont menés par la régie Sydney Water chez qui se trouvent les compétences nécessaires.

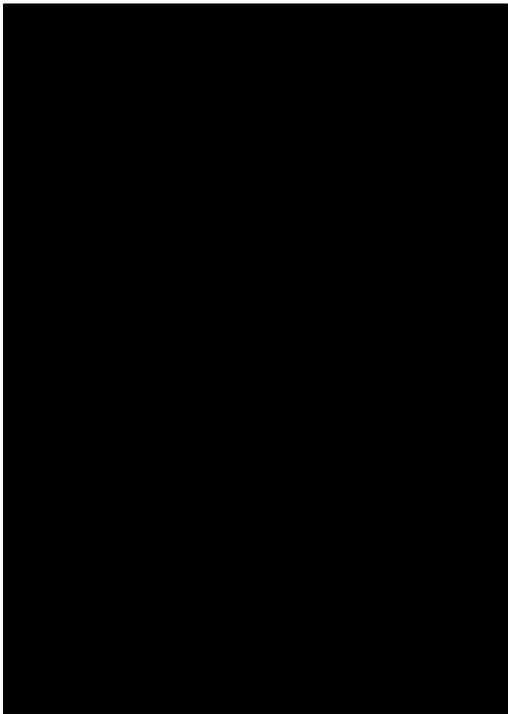
⁵ « Dual reticulation » en anglais

⁶ « stormwater » en anglais

⁷ (GNFP, 2006). Le rapport mentionne aussi une faible probabilité de pollution par des connexions illégales de réseaux d'eaux usées.

⁸ Source : « City of Sydney 2007 »

La capture d'eaux pluviales est déjà une réalité dans des centres municipaux de communautés ou pour enfants (14 réservoirs), ou dans certains dépôts (17 d'ici juillet 2007). Les projets réalisés à Surry Hills ou comprennent des réservoirs de respectivement 240 et 100 m³. Il doit être mentionné que l'efficacité économique des réservoirs d'eaux pluviales, controversée en France (JDLE, 2007a), l'est aussi en



Australie (National Water Commission, 2007): en fonction des précipitations moyennes des villes, de la surface du toit collectant les eaux pluviales et de la capacité du réservoir, il est en effet estimé que le coût de telles installations individuelles varie entre 2.03\$/m³ (Sydney, 10m³ de capacité, 200m² de surface au sol) à 11.59\$/m³ (Adélaïde, 10m³, 50m²), soit bien supérieur au prix du mètre cube d'eau potable tarifé par les services publics d'eau des villes concernées.

La ville de Sydney met aussi en place des « bio-fossés »⁹ (photo de gauche) capturant les eaux ayant ruisselé sur les routes, dont la qualité s'affinera en traversant des couches de végétation, afin de pouvoir pénétrer le port plus propres.

La ville de Sydney mène actuellement un projet d'envergure pour collecter et régénérer des eaux de plusieurs sources, avant de les utiliser pour l'irrigation de parc, des usages récréatifs, le lavage de route, et le « Living Colour Program » de la ville

(tenu deux fois par an, son objectif est de permettre l'embellissement de la ville grâce à des fleurs). Les traitements envisagés, classés par l'origine de l'eau collectée, sont listés ci-dessous (GNFP, 2006):

Source	Polluants, traitement requis	Commentaires
Forage Busby	Particules, bactéries et/ou spores fongiques → filtre à particules et désinfection	La désinfection sera probablement UV plutôt que chimique, avec une vérification régulière
Infiltration du Cross City Tunnel	Idem	Idem (mais pourrait ne pas nécessiter de désinfection)
EPU des parcs Hyde et Cool and Phillip	Idem	Idem
Eaux d'écoulement sur routes	Pétrole, nourriture, fèces, bactéries, champignons, en sus des polluants habituels. Requiert	Nécessitera la chloration et les UV pour désinfecter et supprimer les bactéries, avec

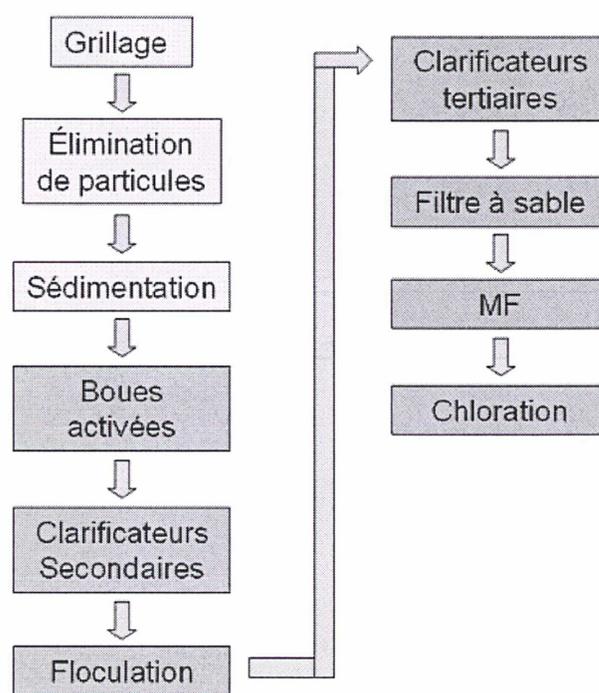
⁹ « Bioswales » en Anglais

	un piège grossier à polluants, un filtre à particules, un filtre à sable, et une désinfection des bactéries/ UV	en sus un traitement pour supprimer le chlore avant utilisation (cher)
Eau de sous-sol et de drainage du parc Cook&Phillip	Particules, bactéries et/ou spores fongiques → filtre à particules et désinfection	La désinfection sera probablement UV plutôt que chimique, avec une vérification régulière
Eau de rétrolavage du parc Cool&Phillip	Très contaminée, très saline, graisses, bactéries, produits à base de chlore, etc...	Une série de filtres à buts multiples, RO, UV

Les coûts indicatifs des traitements sont donnés dans le chapitre IV.

b) Sydney Water – Projet Rouse Hill

Sydney Water exploite le plus important projet de réutilisation résidentielle des eaux usées australien dans le quartier de **Rouse Hill** au Nord-Est de Sydney¹⁰. Commencé en 2001, il alimente désormais plus de 16.500 lots avec un volume d'environ 1,9 millions de mètres cube par an pour les chasses d'eau, le jardinage, le lavage de voitures et d'autres usages extérieurs, ce qui a diminué la demande en eau potable de 35%. Le projet vise à s'étendre à 35.000 lots et d'accroître le volume fourni à 4,7 M m³. De la même manière qu'à Adélaïde, Sydney Water a établi un code couleur (lilas) pour le système de distribution afin d'éviter les connexions croisées. L'eau régénérée a une qualité supérieure à ce qui est exigé dans les directives du New South Wales pour les usages urbains : les coliformes fécaux sont typiquement inférieurs à 0.1/100mL, les coliformes à 1/100ml, les virus à 1/50L, les parasites à 1/50l (Sydney Water, 2004).



La motivation principale pour ce projet a été environnementale¹¹, les standards permettant d'évacuer les eaux usées traitées dans la rivière Hawkesbury s'étant avérés trop contraignants.

¹⁰

<http://www.sydneywater.com.au/SavingWater/RecyclingandReuse/RecyclingAndReuseInAction/RouseHill.cfm>

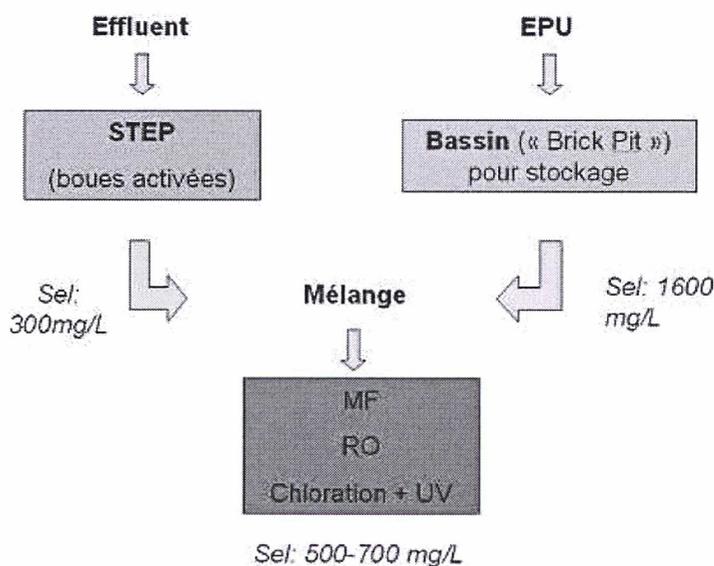
¹¹ Source : entretien de la mission avec Sydney Water

Source :

c) Parc Olympique de Sydney

L'autorité du Parc Olympique a souhaité continuer l'aventure après la fin des jeux olympiques de Sydney (les premiers « Green Olympics¹² »), en transformant le Parc en modèle de développement urbain.

Les effluents traités par la station d'épuration (STEP) du site sont mélangés à des EPU stockés dans un bassin (d'une capacité de 300.000 m³) avant traitement membranaire (la MF éliminant les particules d'une taille supérieure à 0.2µm, la RO réduisant la salinité), chloration et UV. L'usine a été dimensionnée pour traiter jusqu'à 7.000 m³/j (J. Radcliffe, 2004), sur la base d'effluents bruts contenant une DBO de 333mg/l, et des concentrations de SS de 380mg/l, de NH₃-N de 50mg/l, de TKN de 71mg/l et de phosphore total de 15mg/l (Schaëfer et al., 2001).



La stratégie de remplacer systématiquement l'utilisation d'eau potable par celle d'une eau régénérée, d'abord pour l'irrigation et les chasses d'eau des habitations, puis, une fois l'autorité du Parc plus expérimentée et ses habitants rassurés, pour les fontaines, les lacs, le lavage des vêtements, les tours de refroidissements d'air conditionné, la lutte incendie et les animaux domestiques, a porté ses fruits. Les consommations sont listées ci-dessous par qualité d'eau :

	2000/2001	2005/2006
Eau potable (k.m ³)	146	9
Eau régénérée (k.m ³)	25	180
EPU / Eaux pluviales (k.m ³)	130	400

d) Pimpama-Coomera à Gold Coast City, Queensland

La stratégie globale de Pimpama-Coomera (Fligelman et al., 2006) inclut les initiatives suivantes :

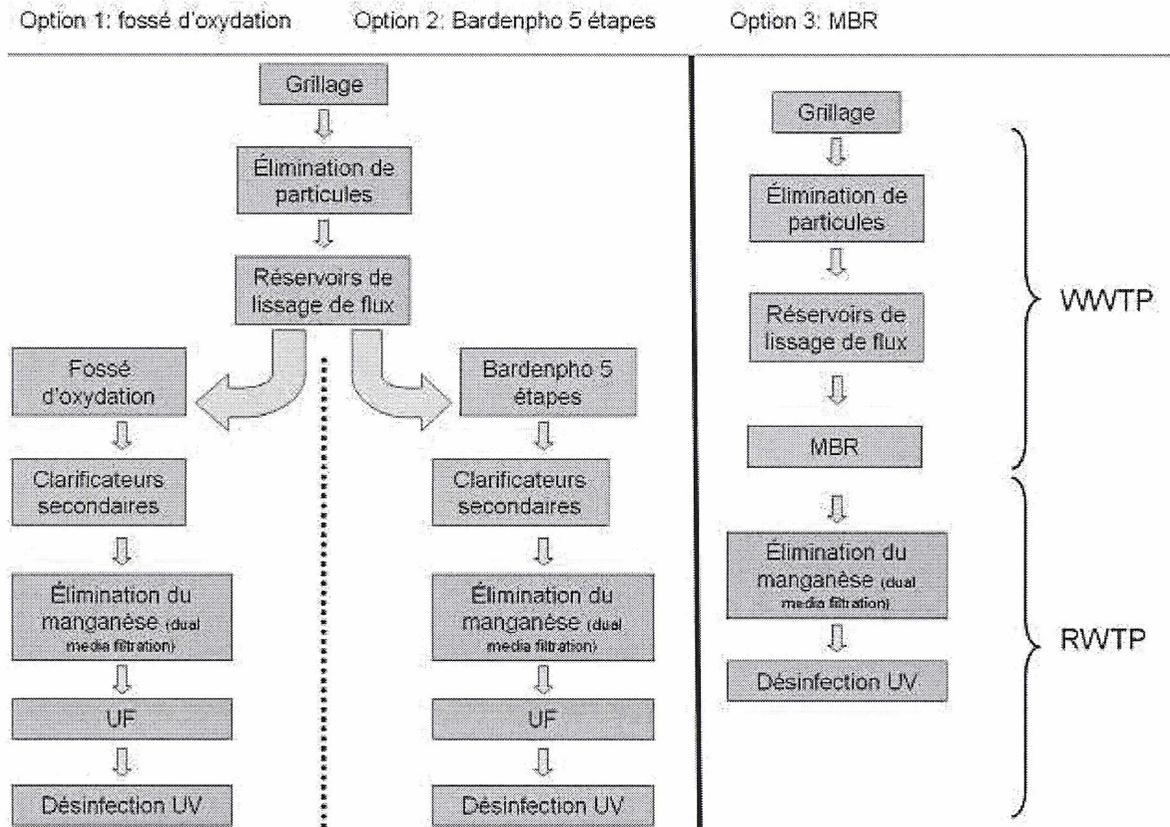
- Tous les nouveaux développements dans le périmètre du captage devront être équipés par un double réseau eau potable et eau régénérée, la dernière étant de qualité A⁺¹³ et dédiée aux chasses d'eau et aux usages extérieurs. Ils devront aussi inclure des réservoirs d'eaux pluviales, qui seront utilisées pour le lavage du linge et l'eau chaude ;

¹² L'initiative serait d'ailleurs poursuivie lors des JO de Pékin en 2008 à en croire « An integrated wastewater treatment and reuse concept for the Olympic Park 2008, Beijing ».

¹³ Telle que définie dans les « Queensland Government Recycled Water Guidelines » de 2005, revues depuis (voir partie III). Cette classe A⁺ était alors définie entre autres paramètres par une réduction de 6 logs en virus, de 5 logs en bactéries (moyenne de E.coli, le traceur, inférieure à 1 CFU/100mL), une turbidité moyenne inférieure à 2 NTU et une concentration en sels dissous inférieure à 1000 mg/l.

- La balance saisonnière sera réalisée par un ASR (Aquifer Recharge & Recovery) ;
- Les plantations de cannes à sucre (et autres espaces) seront volontairement irriguées par de l'eau régénérée de qualité A+, même si une eau de qualité moindre serait suffisante (D. De Haas, 2004).

Trois options concurrentes ont été considérées pour atteindre ces objectifs et sont illustrées ci-dessous :



(Fligelman et al., 2006) indique que le procédé de chenal d'oxydation est économiquement efficace pour atteindre de très basses concentrations en azote ($C < 3$ mg/l) et assez basses en phosphore ($C < 4$ mg/l), possiblement plus basses (< 1 mg/l) avec une solution d'aluminium à 130 mg/l. Le même rapport mentionne aussi que le Bardenpho 5 étapes permettrait une meilleure élimination de l'azote que d'autres solutions compartimentées, mais qu'il nécessiterait néanmoins une faible dose de substrat additionnel pour atteindre le seuil de 3mg/l. La modélisation indiquerait aussi que le procédé réaliserait une élimination significative du phosphore (moins de 3mg/l), mais que pour atteindre la concentration de 1 mg/l, il faudrait compter sur une solution d'aluminium à 95mg/l.

Le document convient que la technologie du bio-réacteur à membrane est significativement plus compacte que les procédés de boues activées plus conventionnels, et permet d'éliminer de très fortes concentrations de solides dissous. S'il admet qu'utilisé conjointement avec des membranes d'ultrafiltration, des niveaux substantiels de virus et de protozoaires sont éliminés, et qu'ainsi le standard A+ d'eaux régénérées du Queensland peut être atteint, il alerte néanmoins le lecteur du fait que la réunion d'un bio-réacteur à UF n'atteint pas les performances d'un procédé séparé de traitement secondaire puis d'ultrafiltration. D'après

celui-ci, l'élimination de bactériophages MS-2 est de 5 log pour le dernier traitement, contre à peine 0,5 log pour le premier.

Le rapport évalue les trois technologies en compétition suivants les critères suivants :

	Chenal d'oxydation	Bardenpho à 5 étapes	MBR	<i>Commentaires</i>
<i>Performance pour l'élimination de nutriments</i>	+++	+++	-	Le bio-réacteur nécessiterait une configuration précise, conjointement avec de grandes quantités de substrat, pour parvenir à la cible de concentration d'azote dans l'eau régénérée.
<i>Robustesse et fiabilité (traitement des eaux usées)</i>	+++	++	++	L'importante recirculation interne et le plus grand volume du bio-réacteur pour le chenal d'oxydation n'améliore que marginalement la robustesse du fossé par rapport au Bardenpho.
<i>Robustesse et fiabilité (réutilisation des eaux usées)</i>	+++	+++	+	Le test d'intégrité des membranes d'un bio-réacteur est généralement plus difficile que pour un module séparé.
<i>Simplicité du procédé (traitement)</i>	+++	++	-	Le plus grand nombre de cycles de recyclage interne dans le procédé Bardenpho diminue sa simplicité.
<i>Simplicité du procédé (réutilisation)</i>	-	-	+++	L'élimination des membranes de l'usine de réutilisation dans l'option du bio-réacteur simplifie considérablement le procédé.
<i>Empreinte</i>	+	++	+++	L'empreinte réduite du bio-réacteur est un avantage. De plus, étant donné les nombreux développements dans ce champ, l'option du bio-réacteur pourrait mieux s'adapter des futures avancées technologiques.
<i>Technologie éprouvée</i>	+++	+++	-	Si l'option du bio-réacteur devait être choisie, l'usine constituerait le plus grand bioréacteur d'Australie avec la plus basse limite en azote.
<i>Gaz à effet de serre</i>	++	+	-	Un bioréacteur génère substantiellement plus de gaz à effet de serre à cause de l'énergie requise pour aérer les membranes, et de la dose importante de substrat requis pour atteindre la limite de concentration en azote. Le mélange et l'aération efficaces du chenal d'oxydation réduisent sa consommation en énergie comparé au Bardenpho.
<i>Éléments communs avec les actifs</i>	+++	++	-	GCW a déjà des chenaux d'oxydation, et une de ses usines utilise un procédé à compartiments qui n'est cependant pas

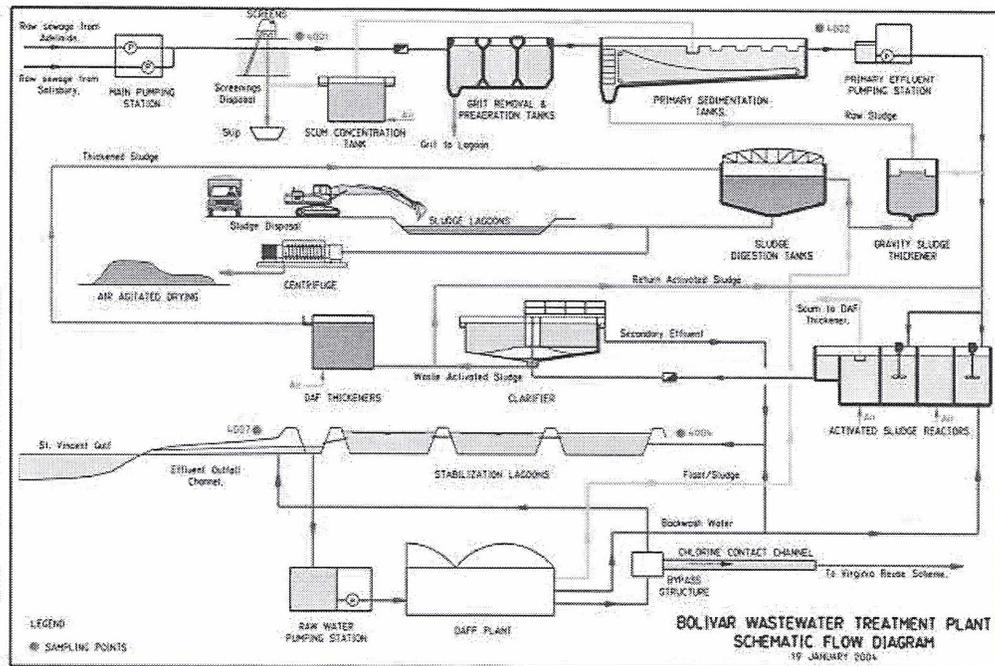
existants de
GCW

basé sur le Bardenpho. GCW n'exploite pas pour l'instant de bio-réacteur.

Cette analyse qualitative met en évidence d'après le rapport cité que l'option MBR ne convient pas au projet. Les deux options restantes seraient départagées lors d'un design de la station plus avancé.

e) Double réseau de Mawson Lakes à Adélaïde

L'usine de traitement des eaux usées de Bolivar, à Adélaïde en Australie, alimente deux filières de réutilisation : l'une agricole (plus précisément horticole) appelée projet de Virginia, et l'autre urbaine, à Mawson Lakes (double réseau, irrigation urbaine et usages décoratifs). La station de Bolivar effectue un traitement biologique (à base de boues activées), puis amène les eaux traitées vers une lagune (où œufs d'helminthe et protozoaires décantent en particulier). Il est expliqué au binôme que le ministère de la santé local est attaché à conserver les lagunes pour traiter, en sus des protozoaires, le cryptosporidium. Suivent une étape de flottation filtration, puis une chloration. Le schéma détaillé est présenté ci-dessous :



Source : SA Water

La réutilisation horticole est relatée dans la partie idoine.
Pour la réutilisation urbaine, les eaux usées traitées, étant très salines en sortie de station (la concentration de matières dissoutes est d'environ 1.200 mg/l), sont mélangées avec des eaux pluviales stockées en nappe¹⁴, puis extraites de celle-ci et revendues par la commune de Salisbury. SA Water chlore le mélange de ces eaux.

Le second réseau d'eau non potable dans le quartier de Mawson Lakes doit pouvoir à terme diminuer la consommation d'eau potable de 50% (source : 12). Les usages faits de l'eau régénérée sont l'irrigation urbaine, la décoration (lacs par exemple), et les usages domestique (toilettes, lavage de voiture, arrosage de pelouse ou de jardin).

¹⁴ Se référer au chapitre sur la recharge de nappe.

2. Usages industriels

a) Projets en Australie

Ville de Sydney – Bluescope Steel¹⁵

Ce projet est le plus important schéma de réutilisation industrielle en Australie, et alimente l'aciérie de BlueScope Steel à Port Kembla.

La station de traitement des eaux usées de Wollongong, après un traitement biologique et une étape de filtration, effectue une microfiltration et une osmose inverse pour une capacité de 20.000 m³/j. Ce nouvel approvisionnement évite donc une ponction de 7.3 10⁶ m³ chaque année sur le barrage d'Avon, et réduit la consommation d'eau potable du plus important des clients de Sydney Water de plus de 50%. Le coût du projet, de l'ordre de 0.7 AUD/m³, sont dus à un pipeline d'approvisionnement très court (environ 3km), à la prise en compte de coûts évités¹⁶ et enfin de volumes importants. C'est le plus bas parmi les projets de réutilisation de Sydney Water.

Ville de Sydney – Camellia¹⁷

Sydney Water a identifié 7 utilisateurs industriels importants d'eau potable dans les régions de Camellia et de Smithfield qui pourraient se voir fournir de l'eau régénérée à la place.

La capacité de la station de régénération, vraisemblablement localisée à Fairfield d'ici 2010, sera d'environ 19.000 m³/j, ce qui économisera un peu plus de 6 10⁶ m³ d'eau potable par an. Elle sera alimentée par le pipeline d'effluents usés secondaires d'Ashfield et effectuera un traitement supplémentaire de microfiltration et d'osmose inverse. Le réseau de canalisations partant de la station de régénération sera d'environ 20 km ; celui-ci ainsi que la station seront possédés et exploités par le secteur privé. Il est estimé que le coût de l'eau réutilisée dans ce projet sera de 2.80 AUD/m³ (en incluant l'investissement)¹⁸.

Le projet du « Western Corridor », Queensland

En substituant de l'eau régénérée à de l'eau potable pour des usages industriels et agricoles, le projet de Western Corridor (WC) est une part cruciale de la stratégie du Queensland contre les sécheresses, en réponse à celle record qui a sévi récemment (Western Corridor Project, 2007). Le projet permettra aussi de réduire les décharges d'eaux usées et de nutriments dans les cours d'eau du Queensland, ainsi que dans la baie de Moreton, améliorant ainsi la santé environnementale de ceux-ci.

Le projet, d'un montant évalué à 1,7 milliards de dollars australiens, inclut :

¹⁵ Source : Entretien avec Sydney Water, <http://www.sydneywater.com.au/SavingWater/RecyclingandReuse/RecyclingAndReuseInAction/RecyclingForIndustry.cfm>

¹⁶ Voir le chapitre sur le « Droit d'exploitation et de propriété des eaux usées » en Australie.

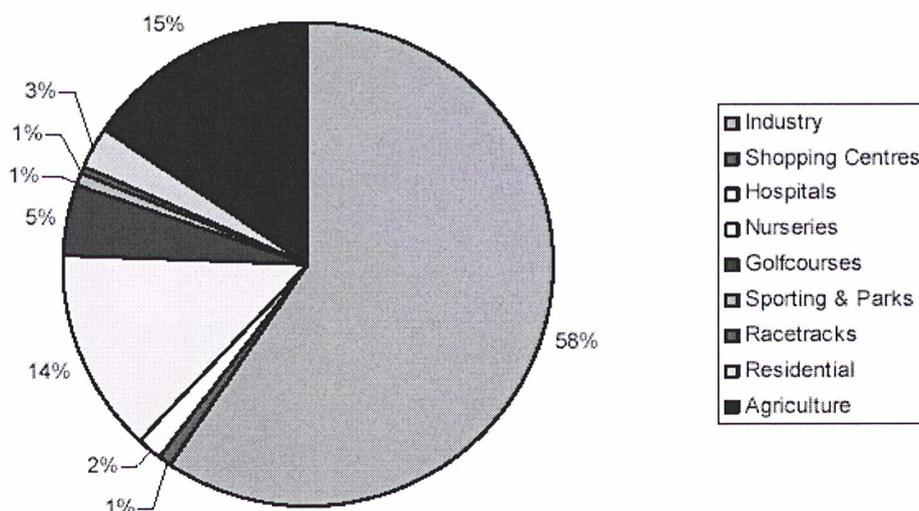
¹⁷ Source : Entretien avec Sydney Water, <http://www.sydneywater.com.au/SavingWater/RecyclingandReuse/RecyclingAndReuseInAction/Camellia.cfm>

¹⁸ Le chapitre IV.3 « Contextes des secteurs de l'eau en Australie et au Mexique » donne des éléments de comparaison à ce dernier prix.

- Une Station de Traitement Avancé des Eaux Usées (STA) à « Luggage Point » d'une capacité de 82.000 m³/j qui sera alimentée par la station de traitement existante ;
- Une STA à Gibson Island d'une capacité de 35.000 m³/j qui sera alimentée par la station de traitement existante ;
- Deux STA (respectivement 1A et 1B) à Bundamba de capacités respectives de 20.000 m³/j et 80.000 m³/j qui traiteront les eaux en provenance de Bundamba (1A) et d'Oxley, Wacol et Goodna (1B, adduction par des pipelines) ;
- Des pipelines amenant les eaux régénérées de « Luggage Point » et Gibson Island vers Bundamba, puis de Bundamba vers la centrale de Tarong à Caboonbah.

Les centrales de Swanbank et de Tarong seront alimentées par une partie du volume en eaux régénérées. Conjointement avec des clients industriels, la part d'eau régénérée qu'elles représenteraient seraient de l'ordre de 50%. Une utilisation agricole a été avancée un moment pour le solde des eaux régénérées. Cependant, l'inflexion politique a changé depuis. Une réutilisation potable indirecte est désormais d'actualité : une partie de l'eau régénérée remplira soit le barrage de Wivenhoe, soit l'amont de la rivière Brisbane où elle se mélangera à l'eau brute existante, avant d'être envoyée à l'usine de traitement d'eau potable du Mont Crosby.

Un recensement très précis a été effectué pour le Gouvernement du Queensland listant de façon quasi-exhaustive tous les utilisateurs d'eau régénérée fournie par le projet (L. Foley, 2002). La méthodologie a consisté à se concentrer sur les zones dont la distance aux pipelines qui seront construits sera inférieure à 20 km. Cette dernière distance sera sujette à variations. Au final, la demande des utilisateurs potentiels se répartissent comme suit :



Le détail des clients potentiels est fourni en annexe 2.

Le projet du WC proposant une unique qualité d'eau régénérée, il est remarqué que les usages agricoles (golfs, pépinières) ne valorisent pas correctement la qualité de l'eau régénérée qui leur serait fournie (qualité D requise d'après la réglementation du Queensland, et qualité A+ fournie). Ces usages sont néanmoins envisagés dans le projet.

Les STA comprendront :

- un traitement membranaire (MF / UF),

- une osmose inverse (le sous-produit de l'osmose inverse sera traité pour réduire les concentrations en azote et phosphore avant son rejet dans la rivière),
- une oxydation avancée (les UV combinés au peroxyde d'hydrogène pour se débarrasser des perturbateurs endocriniens),
- une stabilisation (dont un contrôle de la dureté de l'alcalinité) et une désinfection par chloration.

Il est attendu que l'opérateur du WC devra réaliser une analyse de risques ainsi qu'un Plan de Contrôle des Etapes Critiques (PCEC) qui décrira les actions à entreprendre lorsque la qualité de l'eau régénérée n'atteint pas le standard requis : celles-ci, qui dépendront des circonstances, pourraient inclure le retraitement de l'eau, ou son rejet dans la rivière.

Luggage Point, Brisbane, Queensland (Australie)

Luggage Point est la plus importante station d'épuration de Brisbane, avec une capacité d'environ 140.000 m³/j. Après un traitement primaire, une étape d'épuration par bio réacteur à membrane est effectuée. Environ 10.000 m³/j subissent ensuite un tamisage à 300µm, puis une microfiltration et enfin une osmose inverse (l'investissement correspondant à ces étapes supplémentaires étant d'environ AUD 20M dépensés il y a un peu plus de six ans). L'eau déminéralisée est ensuite envoyée vers les tours de refroidissement et les chaudières d'une raffinerie de BP. Le faible taux de matières

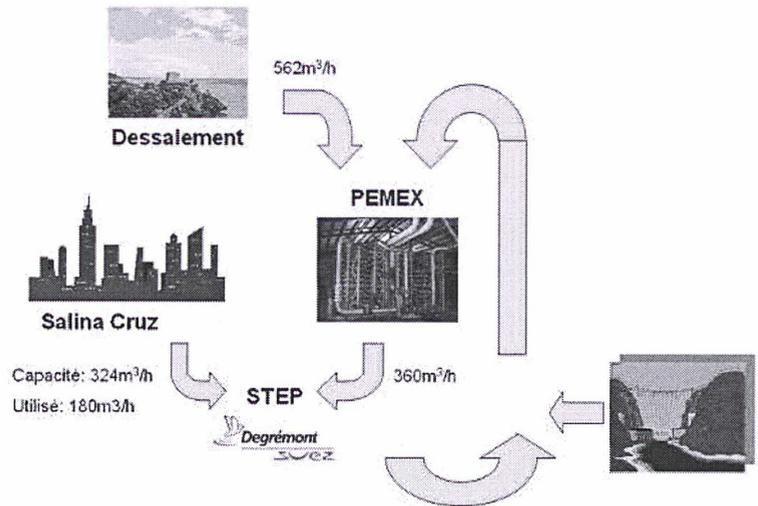
dissoutes permet de doubler environ le nombre de cycles effectués par l'eau dans la tuyauterie de la raffinerie, passant de 5 à 10. La qualité de l'eau serait une conductivité de 60 à 120µS/cm, un pH de 6.5 à 7.2, une turbidité inférieure à 0.1 NTU et une concentration de chlore libre de 0.3 à 0.5 mg/l (Hopkins et al., 2002). Bien que le tarif ne soit pas dévoilé, les auteurs apprennent que des clients futurs se verraient facturer 90% du prix de l'eau potable pour cette eau régénérée.

b) Projets au Mexique

Projet PEMEX, Salina Cruz

L'usine PEMEX (Petróleos Mexicanos) de Salina Cruz, Mexique, est alimentée par 4 types différents d'eau : des eaux industrielles et résiduelles urbaines régénérées, de l'eau de barrage, et de l'eau saumâtre provenant de puits à proximité de la mer dessalée.

La filière du traitement des eaux industrielle usées a une capacité de $360\text{m}^3/\text{h}$, celle des eaux usées urbaines de $324\text{m}^3/\text{h}$ (dont seulement 180 sont utilisés actuellement), et enfin la station de dessalement a un débit de $562\text{m}^3/\text{h}$.



Le traitement des eaux industrielles usées consiste en :

- Une étape biologique : oxydation des sulfures, coagulation floculation puis flottation pour l'élimination des graisses et des solides, une addition de méthanol pour enrichir l'eau en carbone avant une étape de boues activées comprenant une nitrification dénitrification, et enfin et une aération et une clarification ;
- Une étape chimique : addition d'hydroxyde de sodium et de carbonate de fer, réacteur avec addition de polymères, clarificateur, stabilisation de pH, filtration sur sable. Les boues sont déshydratées puis enlevées.

La salinité, entre 2.2 et 2.5g/l , reste à peu près constante entre l'entrée et la sortie du traitement.

La filière de traitement des eaux usées urbaines pour réutilisation collecte aussi celles des habitations de la raffinerie de PEMEX (environ 20% du volume). D'une capacité de 90L/sec , elle ne traite actuellement que 50l/sec : Salina Cruz compte environ 120.000 habitants, mais seulement le centre ville est équipé d'un réseau d'égouts, tandis que la périphérie dispose généralement de fosses septiques.

Les différentes étapes de l'épuration sont un prétraitement par dégrillage, un dessalement et un dégraissage, un traitement biologique et une clarification une filtration sur sable, puis une addition d'hypochlorite de sodium pour désinfecter. Les boues sont stabilisées, déshydratées puis enlevées.

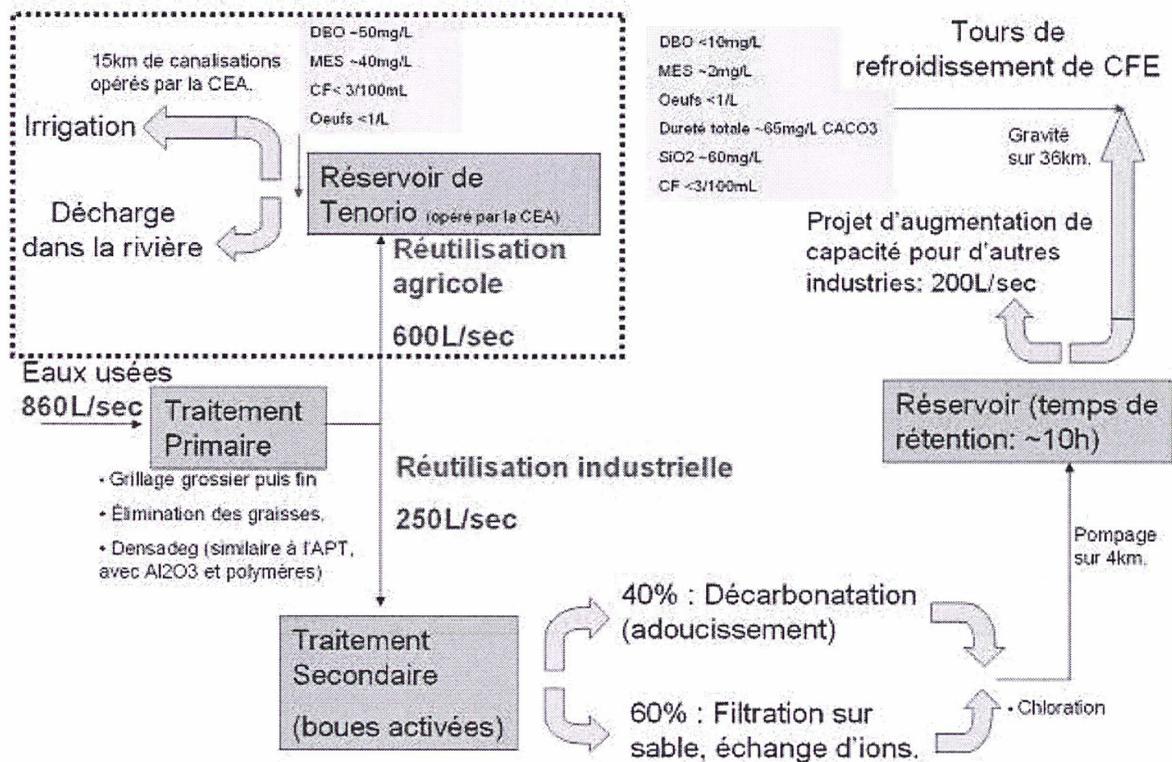
La station de dessalement par filtration sur sable puis osmose inverse a une capacité de 156l/sec . Les eaux salées sont extraites de puits en bordure de mer, ces eaux saumâtres ayant une salinité de 22g/l comparée à celle de 36g/l de l'eau de mer.

50l/sec de la filière de dessalement sont mélangés à l'eau du barrage ainsi qu'aux eaux usées industrielles et urbaines pour refroidir les tours de la raffinerie. Les 106l/sec restants sont

utilisés pour la génération de vapeur. L'ajout des eaux du barrage permet d'atteindre le besoin d'eau de PEMEX, ainsi que de diluer le taux sinon assez fort de matière dissoute.

CFE à San Lui Potosi

Le projet de réutilisation des eaux usées de San Lui Potosí mixe deux usages, l'un agricole et l'autre industriel (tours de refroidissements de la Comisión Federal de Electricidad – CFE), comme expliqué schématiquement ci-dessous :

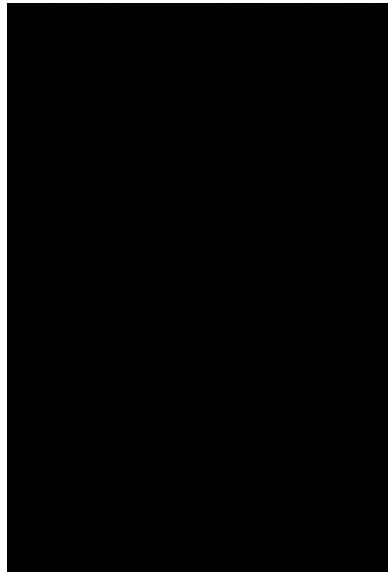


Les eaux usées ne subissent qu'un traitement primaire avant réutilisation agricole. Celui-ci consiste en, pour un débit en entrée d'environ 860l/sec :

- Un dégrillage grossier puis fin ;
- Un dégraissage ;
- Un traitement « Densadeg » (voir photo à droite) ou sulfate d'aluminium (Al_2SO_3) et polymères sont ajoutés.

Les avantages du traitement Densadeg par rapport au traitement primaire avancé classique sont, d'après (D. Lamotte, 2002) :

- une forte concentration des boues produites (5 à 8%) qui peuvent être déshydratées directement sans nécessité de passer par une étape



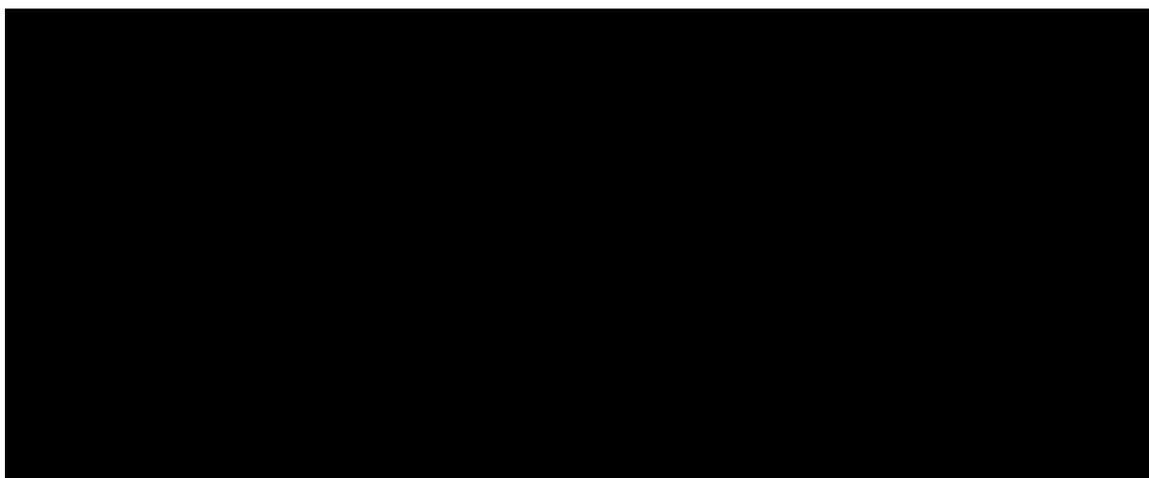
d'épaississement ;

- une excellente qualité de l'eau traitée (MES entre 20 et 40 mg/l) ;
- une économie des réactifs de 10 à 30% par rapport aux technologies conventionnelles, et une adaptabilité aux variations de débit et la qualité des eaux brutes.

Un embranchement après ce premier traitement divise le flux d'eaux usées en deux filières.

600L/sec sont dirigés vers le réservoir de Tenorio avant réutilisation agricole. En fonction des débits réellement utilisés par les agriculteurs, le surplus d'eaux usées traitées non consommées est déversé dans une rivière (seuls 240l/sec sont utilisés en moyenne, si bien que la station de pompage ne fonctionne qu'entre 09 à 15h). Au point de mesure en sortie de réservoir, les eaux ont une DBO d'environ 50mg/l, des MES d'environ 40mg/l, moins de 3 coliformes fécaux par 100mL et moins d'un œuf d'helminthe par litre.

Une seconde filière, industrielle, va faire subir un traitement secondaire aux eaux usées au préalable. La qualité des eaux sera nettement meilleure, comme l'illustrent les deux photos ci-dessous qui comparent la qualité des eaux agricoles (qui contiennent encore des détergents) et industrielles.



Le volume initialement prévu par le contrat avec CFE prévoyait un débit de 450l/sec, alors que la demande actuelle de CFE n'est que de 250l/sec. En effet, la CFE dispose pour l'instant d'une concession de 24.10^6 m³/an sur 27 forages, débit qu'elle pourrait diminuer grâce aux usées traitées (de près de 14.10^6 m³/an). Seulement, une loi fédérale datant de 2004 établirait qu'après 3 ans de débit concédé inutilisé, le volume reviendrait à la CNA, ce que ne peut accepter la CFE. Celle-ci préfère donc s'assurer des ressources futures en continuant à utiliser certains de ses forages, et a intenté un procès à la commission nationale.

Il est envisagé de distribuer le volume qui n'est pas consommé par la CFE à d'autres industriels alentours.

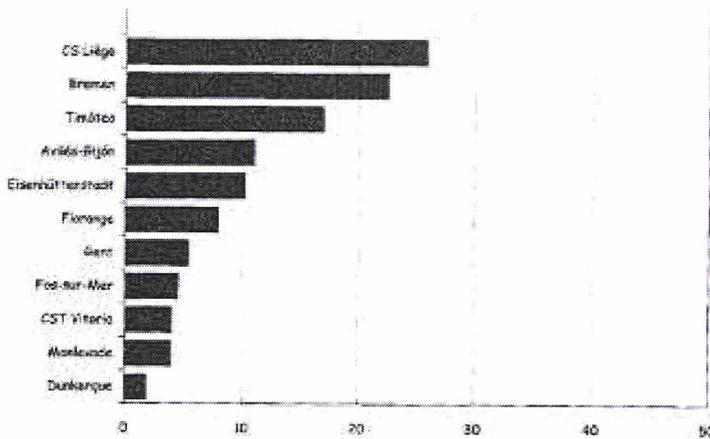
Le traitement supplémentaire pour les eaux usées à usage industriel est le suivant :

- traitement biologique : boues activées ;
- 60% du volume est ensuite filtré sur sable avec échange ionique (réduction des ions calcium, magnésium et sodium) tandis que 40% subit un adoucissement et une décarbonatation ;
- Désinfection par chloration.

Les eaux sont ensuite pompées sur 4km vers un réservoir d'un temps de rétention d'environ 10 heures, puis elles s'écoulent gravitairement sur une longueur approximative de 36km,

avant d'alimenter le circuit de refroidissement de la CFE. Les qualités des eaux usées traitées à l'entrée des points de consommation figurent sur le graphique précédent.

c) Réutilisation des eaux de process chez Arcelor-Mittal à Dunkerque



La réutilisation des eaux usées n'est pas la seule solution pour limiter l'empreinte écologique d'une industrie fortement consommatrice d'eau : la réutilisation des eaux de process en est une autre. D'après un cadre d'Arcelor Mittal, les consommations inférieures à 5m³ par tonne d'acier produit résultent de sites de production où l'eau douce était dès leur construction assez

limitée, et où les circuits des tours de réfrigération ont été fermés - le site de Dunkerque en compterait lui-même 35. Il est remarqué que ce type de circuit est néanmoins une contrainte en cas de contamination par des légionelles. La consommation record du site de Dunkerque (2m³/T) résulte de l'effet d'échelle (une production environ 30% supérieure à celle des autres sites), ainsi que la collecte de tous les rejets d'eau du site, eau de pluie incluse, pour, après traitement, des usages où une qualité médiocre n'est pas rédhibitoire (arrosage de laitier par exemple).

3. Recharge de nappe

a) Mexico (Vallée El Mezquital)¹⁹

La ville de Mexico envoie depuis plus de 100 ans ses effluents, non traités, vers la vallée El Mezquital où ils sont utilisés pour irriguer 80.000 hectares. Le volume important des eaux usées (52m³/sec dont 12 m³/sec moyens d'eaux pluviales), conjointement avec les taux importants d'irrigation, ont contribué à la recharge d'un aquifère local à un volume estimé d'au moins 25m³/sec. Plusieurs sources ont ainsi apparus ces dernières années, avec des débits de plusieurs centaines de litres par seconde. Cette eau, principale alimentation pour la plupart des quelques 450.000 habitants de la zone, ne subit parfois qu'une simple chloration. Plusieurs études furent menées pour analyser la qualité de l'eau en question.

153 paramètres furent inclus pour tester la qualité de l'aquifère de la vallée El Mezquital en trois sites représentatifs. Les résultats figurent ci-dessous (B. Jimenez, date inconnue) : il est clair qu'à travers le transport et l'infiltration (traitement sol aquifère), la qualité augmente pour atteindre une efficacité similaire à un traitement secondaire. Cependant, la salinité de l'eau augmente (concentrations en calcium, magnésium, bicarbonates, sulfates, nitrates, nitrites, dureté, TDS, conductivité et alcalinité).

Paramètres (mg/l sauf mention contraire)	Eaux usées	Aquifère	
		Intervalle	Elimination (%)
<i>DCO</i>	476	8-11	98-99
<i>Azote</i>	37	1.5	96
<i>Phosphore</i>	3	0.1-0.2	93-96
<i>Solides dissous</i>	850	945-1040	-11 à -20
<i>Matières en suspension</i>	118	3-4	97-98
<i>Cadmium</i>	0.003	0.002	33
<i>Chrome total</i>	0.042	0.004	90
<i>Fer</i>	1	0.04-0.15	86-96
<i>Plomb</i>	0.09	0.02	77
<i>Zinc</i>	0.22	0.04-0.05	77-82
<i>Nitrates</i>	0.8	18-24	-2900 à -2150
<i>Coliformes fécaux (log, UFC/100mL)</i>	6	<1	6 log
<i>Œufs d'helminthe (œufs/l)</i>	20	0	100

Afin de parer à l'impossibilité d'analyser tous les composés organiques détectés dans les chromatogrammes, une analyse de la biosphère vivant dans l'une des nouvelles sources (celle de Cerro Colorado, un des trois sites précédemment évoqués) fut menée, mettant en évidence la présence de *Cambarrellus* –qui est généralement un indicateur de très haute qualité de l'eau-, et la normalité statistique de la distribution de sexe auprès de deux espèces de poissons.

¹⁹ Sources : (Jimenez et al., 2004), (Jimenez et al., 2005) et (B. Jimenez, date inconnue)

Un pilote a montré qu'un traitement membranaire à base de nanofiltration permettait à l'eau de la source Cerro Colorado d'atteindre les standards mexicain et international pour l'eau potable. En incluant le transport vers Mexico, le coût total de cette eau est évalué à 0.73 US\$/m³.

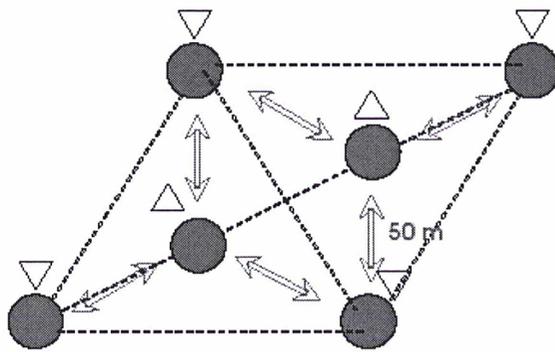
Dans une batterie d'autres tests de puits, l'eau de 2 sites avec les plus hautes valeurs en carbone organique total fut analysée pour sa teneur en 246 composés volatiles semi-organiques, dont aucun fut finalement détecté (Jimenez et al., 2004). Le même document en conclut que modulo une désinfection et un dessalement léger, l'eau des puits satisfait les critères de potabilité.

b) Projets en Australie²⁰

Un projet pilote d'ASR (Aquifer Storage and Recovery) à Adélaïde a montré qu'un effluent traité par la station de Bolivar (traitement biologique, lagunes d'aération, flottation-filtration et chloration) pouvait être stocké de façon économique et temporaire dans un aquifère calcaire et saumâtre durant l'hiver, pour ensuite être utilisé pendant l'été pour l'horticulture locale, tout en respectant la législation l'irrigation sans restriction.

Paramètres (mg/l par défaut)	Ligne directrices pour l'irrigation (NWQMS)	Aquifère (n=17) (moyenne +/- écart-type)	Eau injectée (n=24), 1 ^o cycle	Eau récupérée	Eau injectée (n=14), 2 ^o cycle	Eau récupérée
Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		3592 +/- 326	2265 +/- 191	2470	1975 +/- 92	2550
Température (°C)		25.9 +/- 1.0	20.4 +/- 4.5	22.7	16.3 +/- 3.6	21.1
pH	4.5-9	7.3 +/- 0.1	7.1 +/- 0.4	7.06	6.9 +/- 0.3	7.31
Oxygène dissous		0.77 +/- 0.79	4.4 +/- 3.4	0	6.0 +/- 1.4	0
Matières en suspension		12 +/- 14	14 +/- 13	1	-	-
Solides totaux dissous	1500	2006 +/- 188	1267 +/- 58	1470	1225 +/- 55	-
Azote total		0.08 +/- 0.03	19.9 +/- 10.8	15.6	7.8 +/- 2.5	4.12
Phosphore total		0.02 +/- 0.001	0.72 +/- 0.65	0.24	2.3 +/- 0.9	0.24
Carbone organique dissous		0.3	16.7 +/- 2.1	10.5	19.5 +/- 1.9	12
Carbone organique total		0.3	18.2 +/- 2.3	10.6	20.1 +/- 2.12	12.2
Résidu de chlore total		0	0.7 +/- 0.4	0	3.0 +/- 2.4	-
E.coli (cellules/100mL)	1000	0	42 +/- 113	0	-	-

²⁰ Source : (Dillon et al.)



Source : ASR Project, United Water

Le projet de recherche étudie désormais pour la première fois au monde l'ASR (Aquifer Storage, Transfer & Recovery) avec la construction de 6 puits agencés comme le montre le diagramme ci-contre et espacés de 50 mètres.

Les 4 puits extérieurs serviront pour injecter à 170 mètres une eau de pluie traitée par lagunage, et les 2 centraux pour la pomper hors de l'aquifère. Les premiers tests montreraient que la qualité de l'eau recouvrée est proche du standard d'eau potable.

c) Enjeux de l'ASR et de l'ASTR

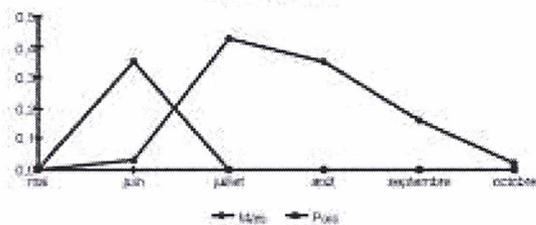
Un stockage nécessaire, et économique

Le stockage des eaux usées régénérées en aquifère répond, dans le cas de l'usage agricole, au problème majeur de rapprocher offre et demande pour la ressource eau.

Les besoins en eau se concentrent en effet généralement sur les mois de juillet et d'août alors que les précipitations, sur l'exemple de la région parisienne, restent proches de la moyenne annuelle.

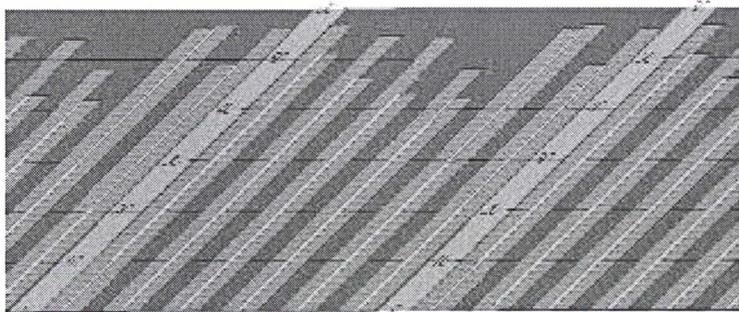
Dans le cas de la recharge de nappe par des eaux pluviales, une lagune est nécessaire pour accumuler temporairement

Besoins en eau du pois et du maïs en litres (moyennes)



Source : *Irrigation ou la cruelle vérité des chiffres ; L. Desmytter*

Source : Météo France



Source : Météo France

les précipitations dont le débit est supérieur à la vitesse de pompage pour infiltrer les eaux, ceci afin d'éviter des inondations. Ces espaces de stockage à la surface représentent le coût principal de tels projets (Dillon et al.), mais peuvent préexister au projet. L'ASR permet une utilisation minimale du foncier, d'infrastructure et d'énergie.

Une technique en plein essor pour pré-traiter économiquement avant usage potable

Les projets de recherche sur l'ASR se multiplient récemment. Il convient de mentionner aussi celui mené à Berlin : pour la région ouest de Berlin, les ressources en eau ont uniquement consisté en l'aquifère souterrain pendant plusieurs décennies (B. Heinzmann), dont la recharge naturelle de 200mm/an est insuffisante pour combler les prélèvements. Environ 664.000m³/j d'eaux usées traitées furent infiltrés en 2002. Elles parcourent un trajet minimum de 50 jours environ avant d'atteindre les puits. Le projet NASRI (Natural and Artificial Systems for Recharge and Infiltration) qui s'y rattache, fondé par Veolia Water et BWB, a débuté en mai 2002. La recharge de nappe est dans cette ville aussi considérée comme un procédé peu coûteux et efficace pour pré traiter l'eau avant sa consommation potable. D'ailleurs, le traitement de l'eau brute par Berlin, qui consiste en une simple aération, élimination du manganèse et du fer, puis une filtration, se distingue de la majorité des villes allemandes en ce qu'une désinfection n'est pas nécessaire (évitant ainsi des problèmes de sous-produits de celle-ci).

Ces conclusions rejoignent celles de B. Jimenez pour l'expérience de Mexico.

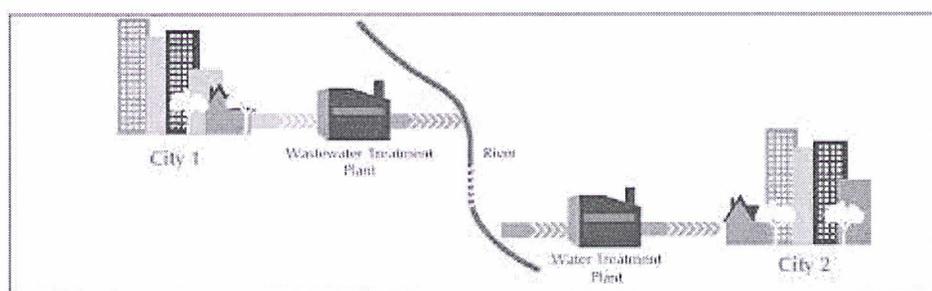
Il peut enfin être argumenté que le temps de rétention dans l'aquifère ajoute une barrière de sécurité supplémentaire dans la chaîne de traitement, dont la filtration souterraine est une composante passive.

4. La réutilisation potable

En Australie, les Etats se divisent sur la réutilisation potable. Certains Etats, comme celui du Queensland, y sont favorables, malgré même le référendum mené dans la ville de Toowoomba où l'option d'augmenter la ressource d'eau potable en réutilisant des eaux usées fut rejetée à près de 62% en juin 2006. La toute récente législation de cet Etat prend donc en compte ce type d'usage (se référer au chapitre sur la réglementation).

Le Mexique envisage la réutilisation potable des eaux usées après une infiltration de nappe. Le projet est décrit précédemment.

Il est surprenant de noter qu'alors que la France se défend de vouloir autoriser ce type de réutilisation, la perception de pays tels que l'Australie de la situation française (et anglaise) est tout autre. Il transparaît en effet pour les Australiens que les Français, grâce à leurs longs fleuves où effluents traités sont déversés, puis indirectement prélevés plus loin en aval par une adduction menant à une station de traitement d'eau potable, pratiquent déjà cette réutilisation potable depuis bien longtemps :



« Why doesn't Australia follow London's example ? » (WSAA, 2006)

On peut rappeler à titre d'exemple qu'on estime qu'en étiage, la moitié de la Seine à Paris serait issue de dispositifs d'assainissement (D. Fourmeau, 2002). On parle ainsi de réutilisation potable indirecte et non planifiée²¹.

La réutilisation potable est encore peu répandue, même au plan international. On peut citer pour mémoire les exemples de Windhoek en Namibie, et de Singapour. La recharge de nappe suivie d'une utilisation potable a déjà été citée : c'est le cas de la vallée El Mezquital au Mexique, ou de la situation berlinoise où la nappe est rechargée artificiellement par des eaux usées traitées percolant au minimum 50 jours dans le sol avant pompage puis boisson.

Singapour (PNUE et GEC) a lancé en 2003 son nouveau système de régénération (microfiltration, osmose inverse et UV), présenté au grand public dans un centre d'information. Des efforts marketing importants avaient précédé la commercialisation du « NeWater » depuis mi-2002 (publicité, posters et échantillons de la nouvelle eau). Un sondage indépendant d'octobre 2002 révélait que 82% des citoyens avaient une totale confiance en cette eau. En 2006, près de 18.000 m³/j d'effluents traités étaient ajoutés aux réserves d'eau brute de la ville à des fins potables (World Bank, 2006).

La ville de Windhoek en Namibie est située dans une des régions les plus arides au monde, la plus proche rivière, l'Okavango, se trouvant à quelques 700km de la ville (Lahnsteiner et al.). Alors qu'initialement les effluents usés et traités ne représentaient que 3 à 8% d'un mélange

²¹ « unplanned indirect potable reuse » dans la langue de Shakespeare

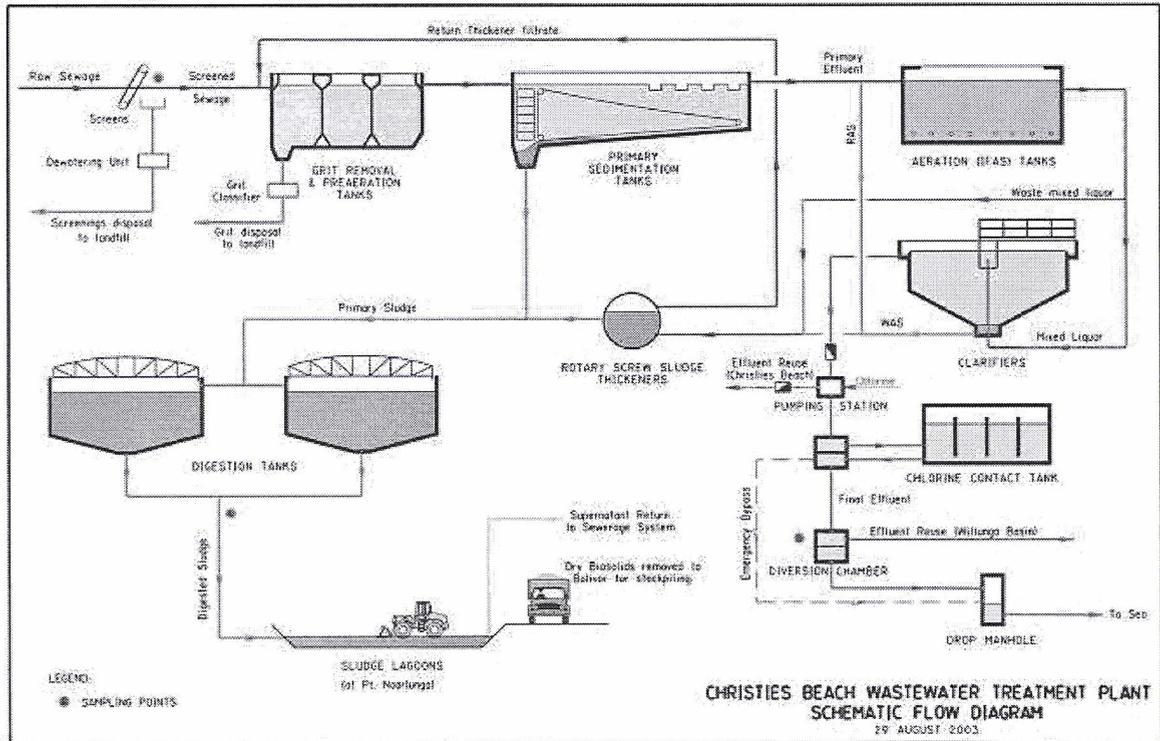
largement constitué d'eaux brutes venant d'un barrage ou de forages, la proportion atteint 50% dans la nouvelle station de régénération de Goreangab qui fut inaugurée en décembre 2002. L'eau en provenance du barrage s'avérant être de trop mauvaise qualité, ce sont désormais 100% d'effluents usés qui alimentent la station. Les coûts opérationnels, de l'ordre de US\$ 0.76/m³, sont inférieurs à ceux d'autres options, telle celle d'aller chercher l'eau dans la rivière Okavango.

5. Usages agricoles

Il est intéressant de noter que l'usage agricole est très souvent présent dans les projets rencontrés, mais pas de manière exclusive, la capacité à payer des agriculteurs étant souvent trop faible pour faire émerger un projet de réutilisation dédié à ce seul usage. Ceci est discuté plus avant dans la partie dédiée à l'économie de la réutilisation.

a) Réutilisations horticole et viticole à Adélaïde

Un projet autofinancé (J. Radcliffe, 2004) a émergé pour les effluents de la station de traitement des eaux usées de Christies Beach. Cette station effectue une épuration à base de boues activées et de chloration, pour obtenir une eau de qualité moyenne (coliformes thermotolérants : 100 à 1000 CFU/100mL). La « Willunga Basin Water Company », formée par un groupe de viticulteurs à la recherche de plus d'eau pour leurs cultures, négocia l'accès à ces effluents qui sinon étaient déversés dans le Golfe Saint Vincent. Un système de canalisations de couleur pourpre – afin de les distinguer clairement des autres tuyaux - de 13km fut construit. Les nouveaux utilisateurs doivent payer une taxe d'entrée de AUD 6.000, puis l'eau régénérée est tarifée à 65% du prix de l'eau potable. La salinité, de 750 à 900mg/l, est moins que celle de la nappe désormais de toutes façons sur-exploitée.

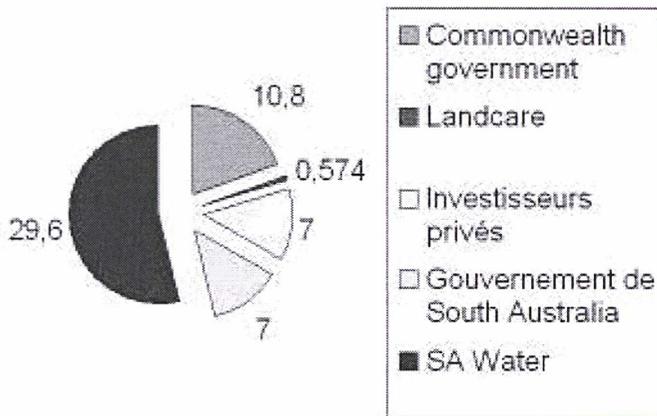


Station de traitement des eaux usées de Christies Beach – Source : SA Water

Les eaux usées traitées ont permis (C. Marles, 2004) la culture d'environ 8 km² supplémentaires, générant un revenu annuel de AUD 20 à 30 millions. Le projet a permis de réduire de 30% les effluents vidés en mer, soit, en comptant les améliorations du système, une réduction de 70% des nutriments déchargés. En 2007, le volume annuel réutilisé est (SA Water, 2007) de 2,4 10⁶ m³, soit environ 23% de la capacité de la station.

La station de Bolivar, précédemment décrite dans les projets de réutilisation urbaine, alimente principalement le projet de Virginia pour une irrigation horticole. Un traitement supplémentaire de filtration flottation, incorporant (J. Radcliffe, 2004) une coagulation à base d'aluminium et de polymères, une floculation, une flottation par air dissous, une filtration granulaire multi-media et une chloration. Les lagunes furent conservées d'abord pour le traitement supplémentaire qu'elles apportaient, ensuite pour le tampon qu'elles offraient pour toute décharge industrielle anormale qui aurait compromis la qualité de l'eau, et enfin pour leur capacité de stockage qui permettait une ventre estivale supplémentaire. L'eau sortante a une qualité similaire au Title 22 californien²². La société Water Reticulation Services, filiale de Tyco Corporation, gagna l'accès à cette eau (gratuit jusqu'à 24 M m³/an, en 2007 le volume annuel est d'environ 15 M m³), en fit la promotion commerciale et installa le réseau de distribution.

²² Se référer à la partie III pour la description de ce standard.

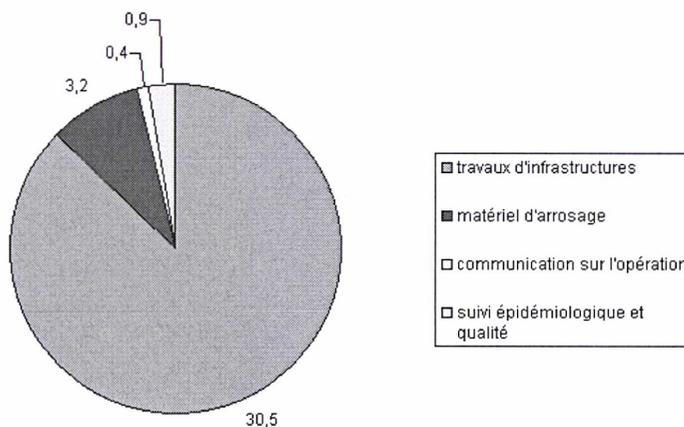


Le financement de l'opération figure à gauche : l'usine de filtration-flottation coûta²³ environ AUD 30 millions, et le système d'irrigation d'une centaine de kilomètres AUD 22 millions. Les premiers clients du système se virent offrir des prix attractifs, de AUD 7 ct/m³ l'hiver à 12 ct/m³ l'été. Les nouveaux entrants doivent payer plus pour compenser le fait qu'ils s'intègrent à un système qui ne les avait pas prévus initialement. D'après SA

Water (C. Marles, 2004), qui reprendra tous les actifs en 2019, ce projet est « commercialement viable et économiquement soutenable ». Le gain est, d'après cette même source, double : pour les agriculteurs, et pour l'environnement marin – qui reçoit moins de nutriments en particulier.

b) Réutilisation agricole à Clermont-Ferrand

Le projet de Clermont Ferrand est unique en France à une telle échelle (Limagne Noire et Somival)²⁴. Ce sont en effet près de 700ha de céréales et de betteraves qui sont irrigués par des eaux usées traitées. Celles-ci, après un traitement classique en station d'épuration, séjournent au moins 13 jours en lagunes mises à disposition par la Sucrerie de Bourdon, et où les ultraviolets solaires permettent de supprimer parasites et germes bactériens. Ce projet permet de réduire les rejets d'effluents dans l'Allier (jusqu'à 15T d'azote et 1T de phosphore chaque année), et représente un volume annuel d'irrigation de 700.000 à 1.200.000 m³.



Le coût total de l'opération fut de 35 MF, principalement financés par l'ASA de Limagne Noire (12,1 MF), l'Europe (5 MF), l'Etat français (6,1 MF), le Conseil Général (4,7 MF) et l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (4,7 MF). En ajoutant les coûts énergétiques de la station d'exhaure (60 kW) et de celle de reprise (1.200 kW) à l'investissement initial ici arbitrairement amorti sur 30 ans au taux de 5%, on trouve un coût unitaire d'environ 0,4€ /m³, qui

²³

Source :

SA

Water

(<http://www.sawater.com.au/SAWater/Environment/EnvironmentImprovementProgram/Virginia+Pipeline+Scheme.htm>)

²⁴ La réutilisation des eaux usées est de manière générale peu développée en France. En décembre 2004, on recensait 15 projets d'irrigation agricole, 9 d'irrigation de cours de golfs, et 6 d'espaces verts (source : Véolia). Environ la moitié d'entre eux étaient côtiers.

inclut ainsi les infrastructures de distribution.

Ce dernier coût peut être comparé au prix moyen de l'eau des 5 plus grandes villes françaises (2.56€), la facture d'eau se répartissant en moyenne en France à 51% pour l'eau potable (d'où un prix de l'eau potable estimé à 1.31€ pour ces villes) (BIPE/SPDE, 2005).

Lorsque le projet fut initié en 1989, il n'existait pas en France de référence réglementaire pour ce type d'usage : ce sont des études faites par des professeurs des facultés de médecine et de pharmacie de Clermont Ferrand qui précisèrent les modalités d'usage. En 1991, quand les premiers textes furent parus, il fut décidé d'opter pour une eau de qualité A²⁵. Des tests en sortie de lagune²⁶ montrent que depuis 2000, il n'y a aucun œuf d'helminthe détecté, et moins de 700 UFC /100mL.

c) Projet de réutilisation agricole à Grau du Roi

Le Grau-du-Roi²⁷ compte 8.000 habitants permanents, mais jusqu'à 100.000 l'été, représentant une consommation d'environ 12.000 m³/j en août. C'est le 2^{ème} port de pêche sur la côte méditerranéenne en tonnage, ainsi qu'un port de plaisance (« Port Camargue »). La commune s'est développée très intensivement depuis 1960, grâce aux politiques d'aménagement du territoire. L'eau a toujours été vitale pour le développement de la ville. La commune peut compter sur une petite nappe phréatique (proche de la source Perrier de Vergèze), et sur une conduite amenant de l'eau du Bas-Rhône qui est ensuite traitée sur place pour en faire de l'eau potable. Le Grau-du-Roi a été une des premières communes dans les années 60 à traiter ses eaux usées, par lagunage : la commune dispose de 5.600 ha en majorité classés non constructibles. Depuis une dizaine d'années, une station d'épuration déverse ses eaux usées traitées dans les lagunes qui réalisent désormais un traitement tertiaire.

La commune doit arroser l'été près de 50ha d'espaces verts l'été (besoin : 300m³/h) tandis que des millions de mètres cubes d'eaux usées traitées de très bonne qualité sont stockées durant cette même période : en effet, entre les mois de mai et d'octobre les eaux usées ne sont pas rejetées en mer pour conserver la qualité des eaux de baignade. Lors de leur stockage elles sont en partie évaporées ou infiltrées, le solde étant rejeté à la mer en octobre. La réutilisation de ces eaux usées traitées permettrait à la ville de diminuer l'adduction d'eau en provenance du Bas-Rhône (compagnie BRL), achetée au prix d'environ 0,5€/m³.

Deux options sont actuellement à l'étude par la Lyonnaise des eaux : une filière de tamisage et désinfection par UV voire chloration, et l'autre de traitement membranaire, toutes deux permettant d'obtenir un coût inférieur à celui tarifé par BRL. Des tests (S. Hemous, 2006) ont d'ores et déjà montré qu'en sortie de station d'épuration aucun œuf d'helminthe n'était détectable, et qu'alors que les concentrations en E.coli approchaient 10⁵ UFC/100mL en sortie de station, elles étaient inférieures à 100 UFC/100 mL après lagunage. Un dossier sera soumis aux autorités sanitaires d'ici la fin de cette année.

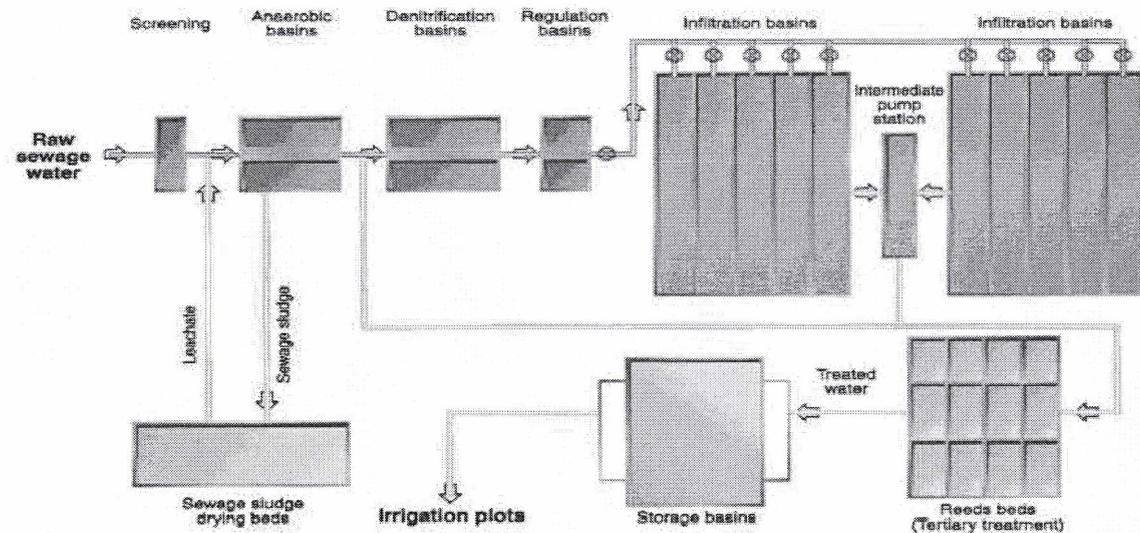
²⁵ Se référer à III.a pour la définition de cette qualité en France.

²⁶ Source : documents internes de Limagne Noire

²⁷ Source : entretien avec Etienne Mourrut, député-maire de Grau-du-Roi, et Pierre Roux et Eric Blin, de la Lyonnaise des Eaux

d) Projet pilote à Drarga, Maroc²⁸

La station de Drarga (6000 habitants) consiste en des bassins anaérobies – avec un temps de rétention moyen de 3 jours - suivis d'une filtration sur sable, d'une étape de dénitrification et d'une filtration sur roseaux, pour une capacité de 1000m³/j.

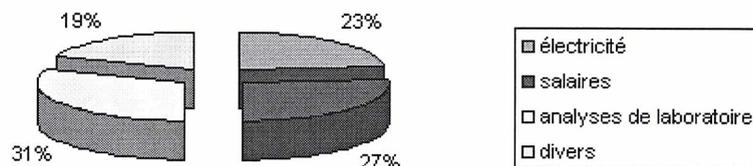


Le projet total a coûté 2 millions de dollars, dont US\$ 100.000 pour le module de régénération permettant d'irriguer avec les eaux usées traitées.

Les coûts opérationnels

sont de US\$26.000 par an, répartis comme indiqué sur le graphique joint. Alors que **près de 70% des stations d'épuration au Maroc ne fonctionnent plus à cause de pièces de rechange manquantes et d'absence de récupération des coûts**, cette dernière a été prise en compte dès la conception du projet de Drarga. La station génère en effet des eaux usées vendues aux agriculteurs, des roseaux coupés et vendus deux fois par an, des boues produisant du compost, et enfin du méthane qui allège la facture énergétique de la station. En n'ajoutant que le coût du module de régénération aux coûts d'exploitation, en amortissant celui-ci sur 30 ans au taux de 5%, et en faisant l'hypothèse d'un flux de 1.000m³/j sur l'année, on trouve un coût d'environ US\$ 0,09/ m³.

Les agriculteurs y gagnent sur deux plans : d'une part, le prix de l'eau produite par la station est inférieur au coût de pompage dans la nappe, et d'autre part les nutriments des eaux usées permettent d'effectuer des économies d'engrais.

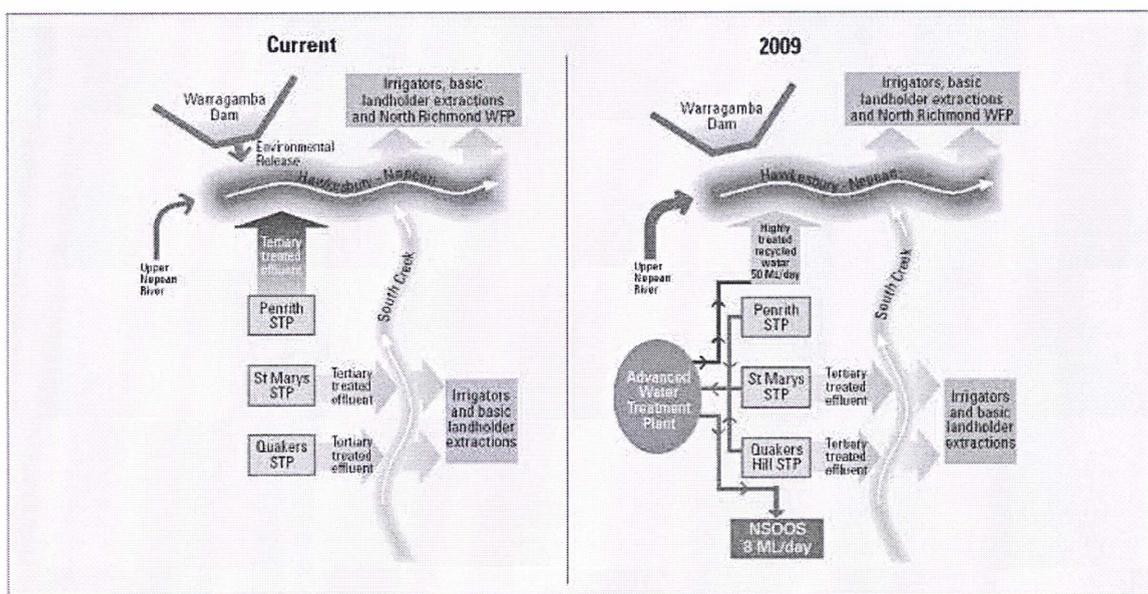


²⁸ Source : M. Kerby

6. Usages environnementaux

a) Projet de remplacement des débits à Sydney (Sydney Water)

Une composante importante (Sydney Water, Replacement flows project) du « Western Sydney Recycled Water Initiative » est le projet de remplacement des débits (« replacement flows project »). Celui-ci consiste à utiliser les effluents tertiaires des stations de St Marys, Penrith et Quakers Hill et de leur faire subir un traitement de régénération avancé (incluant microfiltration et osmose inverse), produisant ainsi 50.000 m³/j d'eau régénérée. Cette eau permettra de remplacer les rejets du barrage de Warragamba sensés maintenir le bon état de la rivière Hawkesbury-Nepean (les rejets de nutriments des stations de Penrith, St Marys et Quakers Hill dans les rivières South Creek et Hawkesbury-Nepean étant diminués). Le coût opérationnel serait d'après les estimations de Sydney Water d'environ AUD 2/m³.



Replacement Flows Project

Source : Sydney Water, Replacement Flows Project

Ce projet, conjointement à d'autres en préparation s'inscrivant dans le « 2006 Metropolitan Water Plan », permettra de réduire globalement la pression sur les ressources actuelles en eau de la ville de Sydney.

b) Projet de soutien d'étiage et de substitution potable à Barcelone, Espagne²⁹

La rivière Llobregat qui alimente Barcelone est trop exploitée (la ville y pompe entre 120 et 150 millions m³/an). Afin de remédier à cette situation délicate, le projet de Barcelone entreprend de régénérer 50 millions m³/an pour différents types d'usages, principalement environnementaux. Ceux-ci figurent dans le tableau ci-dessous :

²⁹ Sources pour ce chapitre : entretien avec Rafael Mujeriogo, (Mujeriogo et al., 2007a)

Utilisation	Flux journalier moyen (m ³ /j)
<i>Soutien au débit des rivières (saisonnier)</i>	175.000
<i>Restauration de marécages (saisonnier)</i>	35.000
<i>Irrigation de substitution (saisonnier)</i>	65.000
<i>1^{ère} phase de lutte contre les intrusions salines (permanent)</i>	5.000
<i>2^{ème} phase de lutte contre les intrusions salines (permanent)</i>	15.000

Le coût du projet est de 102M€. Le traitement par boues activées de l'usine d'El Prat de Llobregat fut amélioré pour incorporer une étape d'élimination des nutriments (nitrification-dénitrification et élimination du phosphore chimique et biologique). Une partie de cet effluent traité par vers un réservoir de stabilisation, puis est dirigé vers l'usine de régénération qui comprend une étape de coagulation-floculation, un tassement par lame, un filtrage à 10µm, une aération et une désinfection UV.

L'eau régénérée est ensuite pompée par deux stations, l'une dirigeant l'eau vers la rivière et les champs à irriguer, l'autre vers les marécages. Le système principal de canalisation totalise 18,8km de longueur, principalement constitués de béton armé de 1,6m de diamètre.

Pour la réutilisation agricole, une partie de l'effluent subira une électrodialyse en 2 phases afin d'abaisser la conductivité du mélange à 1.400 µS/cm (l'usine coûte 16M€ et les coûts d'exploitation sont estimés à 0,24€/m³). L'eau destinée à la lutte contre l'intrusion saline dans la nappe sera elle traitée par chloration, ultrafiltration, osmose inverse puis UV (7.1M€, 0.36€/m³).

Ce projet de réutilisation est accompagné d'un autre de dessalement d'un volume annuel similaire (60 millions m³/an).

c) Projet de soutien d'étiage et d'irrigation à Vitoria (Espagne)³⁰

Les villes de Bilbao et Vitoria se partagent la ressource eau de deux barrages qui les surplombent. Ceux-ci étaient surexploités :

Capacité des réservoirs		Allocations	
<i>Urrunaga</i>	67Mm ³	<i>Eau pour Bilbao</i>	145 Mm ³
<i>Ullibarri</i>	139 Mm ³	<i>Eau pour Vitoria</i>	25 Mm ³
<i>Total</i>	206 Mm ³	<i>Soutien pour les rivières Zadorra et Santa Engracia</i>	30 Mm ³
<i>Volume maximum autorisé</i>	180 Mm ³	<i>Total</i>	200 Mm ³

Un projet de réutilisation a donc émergé à Vitoria. Une usine de régénération d'une capacité de 35.000 m³/j capable de produire de l'eau de qualité « Title 22 » pour l'agriculture sans

³⁰ Source : entretien avec Rafael Mujeriego, Mujeriego et al., 2007b

restriction³¹ est devenue opérationnelle en 1996. Depuis 2005, 10.000ha sont ainsi irrigués, libérant la ressource eau des barrages pour soutenir le débit de la rivière Zadorra, et produire de l'électricité grâce aux stations localisées le long de la canalisation principale vers Bilbao. De l'eau régénérée est aussi amenée au pied du barrage pour soutenir les débits écologiques de rivière.

Le coût du traitement de régénération se situe aux environs de 20ct€/m³. La construction d'un barrage et de canalisations pour stocker l'eau régénérée durant l'hiver a impliqué un coût de 2,25€/(m³ de capacité annuelle) qui se divise en 1,7€ de stockage et 0,55€ de canalisations. Ces derniers coûts doivent être ensuite amortis sur leur durée de vie (celle d'un barrage étant typiquement d'une centaine d'années).

7. Tendances technologiques et commerciales

Après quelques projets épars, Sydney Water souhaite conserver un unique type de traitement avant réutilisation (microfiltration et désinfection), tout traitement supplémentaire étant à la charge du client.

D'autre part, la moitié des projets étudiés dans cette étude font appel à un traitement membranaire. Une rigidification de la législation incitera vraisemblablement les opérateurs à avoir de plus en plus souvent recours à des membranes toujours plus fines dans le futur.

D'après cette dernière hypothèse, le prix du mètre cube d'eau régénérée s'orienterait à la hausse, avec une consommation énergétique plus intense aussi d'ailleurs, amoindrissant ainsi un des avantages de la réutilisation par rapport au dessalement.

Il est enfin assez courant d'associer plusieurs clients, plusieurs filières même au sein d'un même projet de réutilisation. C'est en effet une des préoccupations des projets de réutilisation que de trouver une demande solvable, l'augmentation de capacité permettant aussi de bénéficier d'effets d'échelle attractifs.

³¹ Voir partie III, chapitre sur la réglementation californienne

II) Risques

Les systèmes de distribution et de traitement des eaux ont été établis sur le principe de l'éloignement maximal entre le point de prise d'eau potable et le point de rejet des eaux usées. Jusqu'au XIX^{ème} siècle, cette séparation était assurée dans les villes par la collecte des matières fécales qui étaient triées et achetées par l'officier des basses œuvres (si possible urine et matières fécales, dans des pots, ou une fosse) pour fertiliser les champs des alentours. Les eaux grasses des vaisselles (sans savon) étaient gardées pour les animaux domestiques (le porc en France). Et seules les eaux peu sales de la toilette étaient versées dans le caniveau et rejoignaient les eaux pluviales dans la rigole centrale de la rue. Ce n'est que suite aux travaux des premiers hygiénistes que l'on a commencé à envoyer l'intégralité des eaux usées dans les canaux d'évacuation des eaux pluviales, ce qui a donné naissance au réseau d'assainissement. Or, cette séparation claire entre eaux potables et eaux usées est remise en question aujourd'hui avec la réutilisation des eaux usées.

Par la suite, nous allons examiner les différents risques sanitaires et environnementaux que génère le rapprochement entre eaux usées et eaux de consommation.

1. Risques sanitaires

a) Microorganismes pathogènes

Les risques sanitaires liés à la réutilisation des eaux usées proviennent principalement de l'existence dans les eaux usées de microorganismes pathogènes. C'est lors de l'épidémie de choléra en Angleterre dans les années 1860 que des micro-organismes transportés dans l'eau furent identifiés pour la première fois en tant que déclencheurs de maladies. En 1884, le lien fut établi entre le choléra et la bactérie *Escherichia coli* ou *E. Coli*³² présente dans les matières fécales de malades du choléra. Dans les années 1920, la bactérie *Salmonella typhi* contenue dans l'eau fut identifiée comme une cause de la fièvre typhoïde. Les premiers protozoaires (notamment *Giardia lamblia*) furent découverts dans l'eau dans les années 1960, les premiers virus (rotavirus) dans les années 1970. Enfin, le *Cryptosporidium parvum*, un autre protozoaire, fut associé à des maladies liées à l'eau dans les années 1980.

Les principaux agents infectieux présents dans les eaux usées peuvent être classifiés en quatre grands groupes : bactéries, protozoaires, virus et helminthes.

Typologie

Bactéries :

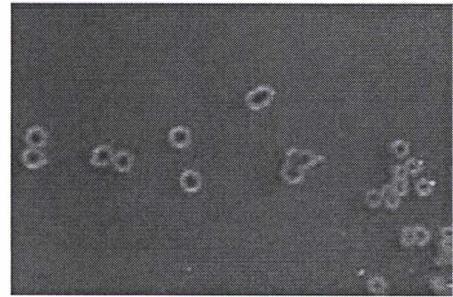
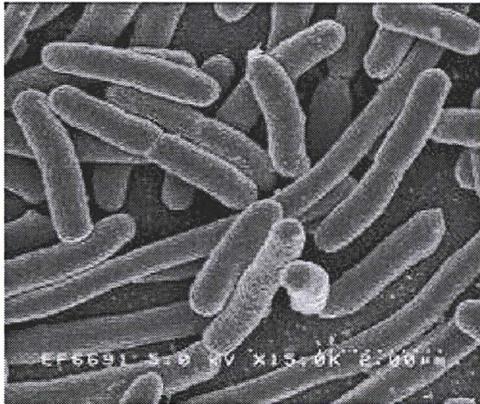
Les bactéries sont des organismes microscopiques d'une longueur variant entre 0,2 et 10µm. Les bactéries pathogènes, et notamment celles du conduit digestif (bactéries entériques), sont présentes dans les excréments d'individus infectés, et par cette voie, dans les eaux usées municipales (Schroeder et Wuertz, 2003). Leur transmission aux humains se fait par la voie féco-orale. Les maladies classiquement liées aux bactéries dans l'eau, telles que la dysenterie, la typhoïde ou encore le choléra, restent un problème majeur pour les pays en développement. Dans les pays développés, où ces maladies ont quasiment disparu, les bactéries sont surtout associées avec des diarrhées d'intensité variable. Aux Etats-Unis par exemple, 14% de toutes les maladies liées à l'eau entre 1970 et 1990 auraient été causées par des bactéries entériques (Craun, 1991).

Escherichia coli fait partie du groupe des coliformes fécaux. Une forme particulière de cette bactérie (O157 :H7) peut causer des gastroentérites graves avec danger de mort. Asano (2006) mentionne une épidémie dans une commune du Missouri en 1989 ayant touché 243 personnes et conduit à 32 hospitalisations et 4 décès. L'autre bactérie connue pour ses effets gastro-intestinaux est *Salmonella*. Il en existe plus de 2200 sérotypes, lesquels sont tous pathogènes pour l'homme.

Photo 1 : *Escherichia coli*

Photo 2 : *Salmonella typhi*

³² Cette bactérie fut baptisée du nom du bactériologue allemand Escherich qui l'a découverte.



Protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires qui sont typiquement plus grands que des bactéries et qui, contrairement aux algues, ne peuvent effectuer la photosynthèse. Les protozoaires sont présents dans les eaux de source et les eaux de mer. Certaines espèces peuvent vivre dans les sols voire d'autres endroits.

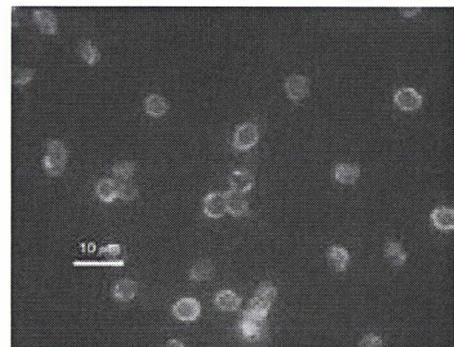
La giardiasis, causée par *Giardia lamblia*, est reconnue comme une des infections protozoaires les plus fréquentes dans des pays développés comme les Etats-Unis. Elle se manifeste notamment par des diarrhées, de la fatigue et des crampes. *Giardia lamblia* a été trouvée dans des eaux usées et s'est avérée plus résistante à la désinfection par chloration que les bactéries. Néanmoins, l'irradiation ultraviolette est efficace pour son inactivation (Linden et al., 2002).

L'autre protozoaire majeur causant des troubles gastro-intestinaux est *Cryptosporidium*. Celui-ci survit dans la nature sous forme d'un oocyste (diamètre entre 4 et 6µm) qui déclenche une infection, une fois qu'il a atteint le tract intestinal. Une épidémie massive de cryptosporidiose à Milwaukee (Etats-Unis) en 1993 avait fait 400,000 malades et environ 100 morts. Comme *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium* est résistant au traitement par chloration, mais devient inactif après irradiation UV (Craik et al., 2001).

Photo 3 : *Giardia lamblia*



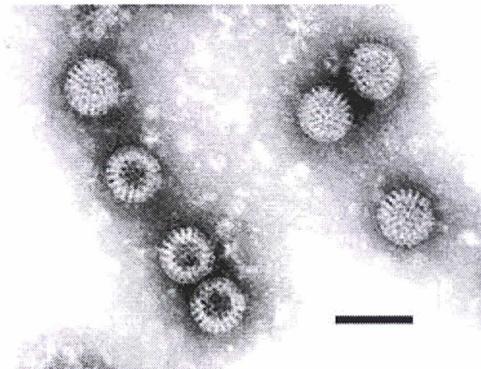
Photo 4 : *Cryptosporidium parvum*



Virus

Les virus sont des parasites intracellulaires qui ne peuvent se multiplier par division, mais doivent infecter une cellule hôte. Ils sont composés d'une molécule d'acide nucléique entourée d'une coque de protéines et varient en taille entre 0,01 et 0,3 μm . La plupart des virus entériques causent des gastro-entérites ou des infections respiratoires, mais certains sont à l'origine d'autres maladies (encéphalite, maladie néonatale, myocardite ou méningite aseptique). Les infections dues au rotavirus touchent particulièrement les enfants. Dans les pays en développement, il est un facteur majeur de mortalité infantile. En outre, la transmission par eau potable est particulièrement forte pour le virus de l'hépatite A.

Photo 5 : Rotavirus



Helminthes

Le terme « helminthes » est utilisé pour décrire un groupe de vers parasitaires. Ils peuvent varier en longueur de 1 mm à plusieurs mètres (!). L'espèce la plus fréquemment rencontrée est *Ascaris lumbricoides* qui est à l'origine de l'ascariasis. Les oeufs d'helminthe sont l'agent contaminant (cf. Photo 7). Leur transmission se fait par l'ingestion de produits agricoles ou de viande (infectée à cause des fourrages consommés par le bétail), ou par le contact direct avec de la matière fécale. Les oeufs mesurent entre 20 et 80 μm et survivent longtemps dans l'environnement (plusieurs années dans les sols ou dans l'eau). En outre, il suffit d'entre 1 et 10 oeufs pour produire une infection (contre environ 10 millions pour les *vibrio cholerae*). Etant donné leur résistance aux traitements par chloration, par UV et même par ozone, la solution pratique la plus fréquemment adoptée est l'inactivation par sédimentation et séparation dans les boues (Jimenez, 2007).

Photo 6 : *Ascaris lumbricoides*

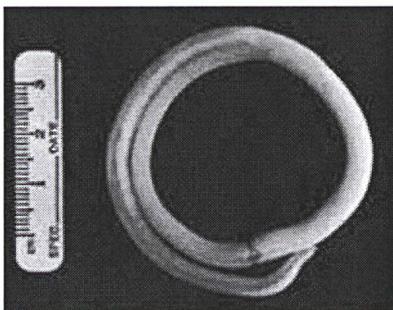
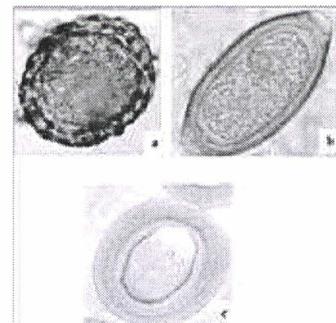
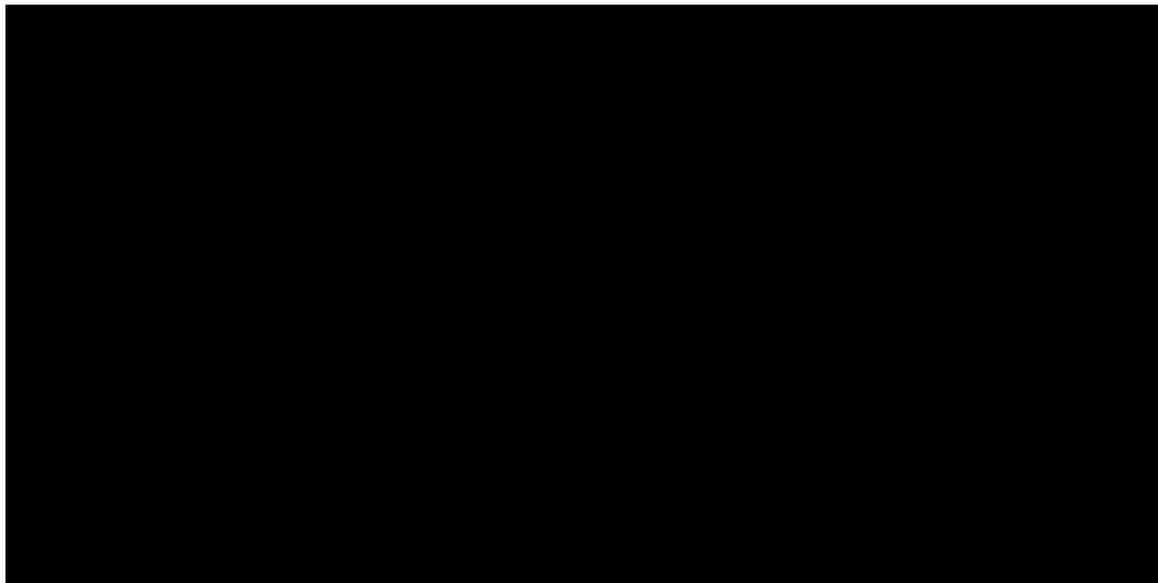


Photo 7 : Oeufs d'*Ascaris* (a), de *Trichuris* (b) et de *Taenia* (c)



Une fois ingérés, les oeufs d'helminthe atteignent le sang, les poumons et le cerveau. Ils peuvent ensuite retourner dans le tract digestif et développer un ver parasite qui peut à son tour voyager dans le corps humain (cf. Photo 8). Dans les intestins, la maladie provoque des problèmes digestifs, des douleurs abdominales, des vomissements et enfin une sous-alimentation. Dans d'autres cas, le ver peut s'implanter dans différents organes (appendice, reins, foie ou même coeur) et même avoir des conséquences mortelles.



Transmission

La transmission potentielle de maladies infectieuses par des microorganismes pathogènes constitue le risque majeur identifié pour la réutilisation des eaux usées. La contamination peut se faire par deux voies.

Elle est indirecte, quand des microorganismes déposés sur des fruits ou des légumes ou sur les plantes de jardins publics sont ingérés.

Elle est directe par voie féco-orale, quand les microorganismes sont inhalés par le biais d'aérosols. L'inhalation de gouttelettes est possible si celles-ci ont un « diamètre aérodynamique » suffisamment faible³³ (les grosses particules vont très rapidement descendre et ne peuvent donc être inhalées). Si le diamètre est inférieur à 100 μm , les gouttelettes peuvent se déposer sur les narines, les fosses nasales, le rhinopharynx et le larynx et ainsi atteindre le tube digestif. Pour des diamètres inférieurs, l'intrusion peut même atteindre la fraction thoracique (trachée) et les alvéoles des poumons (pour des diamètres inférieurs à 4 μm). Il faut noter que dans les aérosols, il peut aussi y avoir des germes non fécaux à l'origine d'infections respiratoires comme les légionelles, les moisissures et les toxines (ces dernières ne sont pas couvertes par la législation française actuelle).

La transmission de telles maladies par des eaux usées est surtout le fait d'effluents ayant subi seulement au plus un traitement secondaire. Dans ce cas, la concentration en microorganismes reste généralement significative et implique un risque pathogène. Néanmoins, le risque d'une contamination de l'homme et d'une infection dépendent fortement des usages faits des eaux usées. C'est ainsi que toutes les réglementations en vigueur distinguent les usages impliquant

³³ Le diamètre aérodynamique est le diamètre d'une particule sphérique d'une densité de 1g/cm³ qui aurait la même vitesse de sédimentation que la particule en question. Cette unité permet d'établir une métrologie des aérosols.

un contact direct de l'homme avec l'eau (arrosage de cultures maraîchères consommées crues, d'arbres fruitiers et de pâturages par aspersion, d'espaces verts ouverts au public) des usages où ce contact n'a pas lieu (arrosage de culture maraîchères consommées après cuisson, de céréales et fourrages, de cultures florales, arbustes et pépinières par aspersion).

Impact sanitaire et spécificité des pays en voie de développement

Pour comprendre l'impact réel des risques sanitaires, il faut s'intéresser d'abord à la situation particulière des pays en voie de développement. En effet, l'utilisation d'eaux usées non traitées pour des usages agricoles y est courante, comme cela a été le cas pendant des siècles dans des villes comme Berlin, Londres, Milan ou Paris (AATSE, 2004). En Chine, en Inde et au Vietnam, l'eau usée est utilisée de longue date à cause de son apport en nutriments et de son effet bénéfique sur la qualité des sols. Avec les problèmes de rareté croissante de la ressource eau, l'utilisation des eaux usées a pris de l'importance. A Hanoï, 80% de la production de légumes proviennent de champs en milieu urbain et périurbain qui sont irrigués avec des eaux usées diluées dans le delta du Fleuve Rouge (Lai, 2000). Autour de la ville de Kumasi au Ghana, les terres irriguées de manière informelle avec des eaux usées diluées des cours d'eau environnants couvrent une surface de 11.500 ha, soit plus que la surface irriguée officielle (Keraita et Drechsel, 2004). Enfin, il y a environ 260.000 ha de terres agricoles irriguées avec des eaux usées au Mexique, dont la plupart ne sont pas traitées (Mexico CNA, 2004).

Il est évident que les agriculteurs utilisant ces eaux pour leurs cultures sont exposés à des risques sanitaires extrêmement élevés, notamment en ce qui concerne les vers parasites, les virus et les bactéries. Cifuentes et al. (1992) estiment que les oeufs d'helminthes représentent le plus grand danger de la réutilisation des eaux usées dans l'agriculture. Trang et al. (2006) ont montré notamment que les agricultures irriguant leurs champs avec des eaux usées ont des taux d'infection aux helminthes plus élevés que ceux utilisant de l'eau fraîche, malgré certaines exceptions. Van der Hoek et al. (2002) ont mis en évidence d'autres problèmes de santé liés aux ongles et à la peau. Pour autant, la plupart des études montrant des effets sanitaires négatifs pèchent par le manque de rigueur statistique (Blumenthal et Peasey, 2002). Presque aucune d'entre elles ne combine analyses épidémiologiques (évaluation de la qualité de l'eau et notamment concentration effective de pathogènes dans l'eau utilisée) et analyses quantitatives du risque microbiologique (incluant le risque d'exposition au niveau des individus).

L'exposition massive aux microorganismes pathogènes dans les pays en voie de développement explique les chiffres ci-dessous, lesquels concernent notamment les enfants. Le tableau suivant donne le nombre estimé de victimes de certaines maladies dues à l'usage agricole d'eau usées non traitées. Il donne aussi une autre mesure de l'impact sanitaire que sont les DALYs (« Disability-Adjusted Life Years » – notion pouvant se traduire par « raccourcissement de l'espérance de vie, en années, ajusté du handicap » : cette notion sera évoquée dans la partie III, chapitre 1).

Tableau 1

Maladie	Nombre de morts	DALYs	Commentaires
Diarrhée	1.798.000	61.966.000	99.8% des décès dans des PVD, et 90% chez les enfants.

Maladie	Nombre de morts	DALYs	Commentaires
Fièvre typhoïde	600.000	-	16 millions de cas estimés par an.
Ascariasis	3.000	1.817.000	1.45 milliard d'infections estimées, dont 350 millions engendreront des effets négatifs pour la santé.
Ver à crochet (hookworm)	3.000	59.000	1,3 milliards d'infections estimées (dont 150 millions) .
Filariose lymphatique	0	5.777.000	Les moustiques qui transportent la maladie se reproduisent dans des eaux contaminées. Ne cause pas la mort, mais un handicap grave.
Hépatite A	-	-	1,4 millions de cas par an estimés, dont 15 à 100% souffraient d'une infection préalable.

Source : Jimenez (2006b) d'après OMS (2005)

Notons que les helminthes sont parmi les premières causes de maladies humaines (ascariasis), touchant environ 1,5 milliards de personnes en Afrique, en Amérique latine et en Asie (Jimenez, 2006b), dont plus de 50 millions d'enfants de moins de 15 ans. La maladie la plus répandue est l'helminthiasis (dont l'ascariasis est la forme la plus fréquente). Celle-ci touche 25-33% de la population des pays en voie de développement³⁴. Si son taux de mortalité est très faible, elle limite néanmoins souvent la croissance par l'effet de sous-alimentation. Dans les pays développés, le taux d'incidence de l'helminthiasis est de moins de 1,5%. Néanmoins, l'immigration des pays en développement vers ces pays contribue à augmenter la présence d'oeufs d'helminthe dans les eaux usées urbaines.

Cette situation épidémiologique des pays en développement s'applique aussi à d'autres pathogènes (bactéries, virus, protozoaires, métaux lourds). Ceci explique les différences de concentrations observées dans les eaux usées, notamment pour les œufs d'helminthe (Tableau 2).

Tableau 2

Organisme	Pays développés	PVD
<i>Salmonella typhi</i> , log MPN/100mL	3-4	6-9
<i>Giardia lamblia</i> , log cysts /l	2	4
Oeufs d'helminthe/l	1-10	6-800

Source: Jimenez, 2007

Pour le Mexique, les concentrations mesurées en oeufs d'helminthe par litre varient entre 6 et 330. Le Maroc et la Syrie ont atteint jusqu'à 800, le Brésil 1.000 dans certains cas. En Egypte, on a même observé jusqu'à 3.000 oeufs/l. Une technologie de traitement avec 90% de rendement, telle que les boues activées, ne peut donc pas aboutir aux normes requises de moins d'1 oeuf/l.

³⁴ Ce taux varie en fait entre 10 et 90% selon la classe socio-économique des populations concernées.

Il faut noter enfin que les cas de tuberculose se sont multipliés en Afrique durant les dernières années, de même que des microorganismes comme la bactérie *Legionella pneumophila* causant la légionellose sont réapparus même dans les pays développés : la legionella ayant été trouvée dans des eaux usées en France et dans des eaux régénérées aux Etats-Unis. La résurgence de ces maladies contagieuses que l'on pensait avoir contrôlées ou même éliminées souligne l'importance des aspects de santé publique qui doivent rester l'objectif premier d'une gestion des eaux usées et de leur réutilisation.

b) Substances chimiques

Les risques provenant des éléments chimiques dans l'eau sont généralement moins bien appréhendés. Pour apprécier les caractéristiques chimiques de l'eau, il convient de connaître les sources des différents éléments chimiques que l'on y trouve. L'eau contient naturellement des éléments chimiques organiques et inorganiques (éléments dissous, nutriments, éléments non métalliques et métalliques, gaz), comme par exemple du calcium, du magnésium, du potassium ou du sodium, ou encore de la matière organique naturelle (MON)³⁵. L'eau potable des réseaux publics peut contenir des traces de certains produits cancérigènes comme l'arsenic, le plomb ou le cadmium, dont le risque est cependant connu et bien maîtrisé (Asano, 2006). D'autres substances comme le bore (un engrais important bénéfique aux plantes en faible concentration), la fluorine ou le zinc ne deviennent toxiques que s'il dépassent des seuils assez élevés que l'on ne rencontre que rarement dans les eaux usées (AATSE, 2004 ; Jimenez, 2006a).

Ce sont surtout les différents usages domestiques, commerciaux et industriels qui chargent l'eau potable d'éléments connus et inconnus. Connaître l'augmentation du contenu minéral de l'eau usée – et notamment sa salinité – en fonction des différentes formes d'usage est essentiel pour évaluer le potentiel de réutilisation de l'eau. Typiquement, la matière organique dans l'eau usée est composée à 40-60% de protéines, à 25-50% d'hydrates de carbone, et à 8-12% d'huiles et de graisses. En outre, l'eau usée contient un grand nombre de différents éléments organiques synthétiques, dont la plupart est inconnue. Etant donné l'activité commerciale et industrielle dans les pays développés, le nombre de ces éléments a fortement augmenté depuis le milieu du XX^{ème} siècle. A cela s'ajoutent environ 10.000 nouveaux éléments chimiques tous les ans. Cette évolution continuera à rendre la caractérisation complète des eaux usées un objectif inatteignable, et donc l'analyse des risques sanitaires liés à ces éléments qui pourraient en émaner à moyen et long terme. Ce constat est d'importance pour la réutilisation : s'il est avéré que les traitements existants « nettoient » l'eau de sa pollution organique « classique », il n'est pas certain que les procédés puissent assurer la dégradation complète d'éléments chimiques plus complexes. A l'exception de traitements comme l'osmose inverse, l'oxydation et d'autres traitements avancés, la « signature chimique » de l'eau reste intacte à travers le processus de traitement. A long terme, la réutilisation peut ainsi contribuer à la concentration dans l'eau de certains éléments.

Ajoutons que concernant les éléments chimiques aussi, des différences peuvent être observées entre PVD et pays développés. Les eaux usées des PVD sont souvent moins polluées par des métaux lourds, étant donnée la moindre industrialisation. Cela s'applique notamment à une mégalopole comme Mexico, qui par rapport à la taille de sa population, a peu d'industrie. Pour autant, les métaux lourds peuvent constituer un risque, à cause de l'utilisation pour l'irrigation agricole d'eaux usées qui ont été mélangées à des degrés divers avec des eaux industrielles. Selon Jimenez (2006a), le plus grand risque émane du cadmium qui a des effets toxiques sur l'homme et l'animal à des doses largement inférieures à celles qui affectent les plantes de manière visible. Le cadmium s'accumule en effet dans les reins et le foie, mais reste sans effet sur la viande et les produits laitiers.

³⁵ C'est à cette MON que font référence la DBO (Demande Biologique en Oxygène) et la DCO (Demande Chimique en Oxygène) qui comprend aussi certains éléments organiques synthétiques.

c) Pollutions « émergentes »

Le terme de « pollutions émergentes » fait référence aux éléments chimiques et microorganiques qui ont récemment été découverts, comme les substances pharmaceutiques actives (SPA), les perturbateurs endocriniens et les nouveaux pathogènes. Leur effet spécifique dépend du type de substance, de sa concentration ainsi que de la voie et de la durée d'exposition (Jimenez, 2006a).

Les substances pharmaceutiques actives sont synthétisées à des fins thérapeutiques, comme les antibiotiques, les anti-inflammatoires ou encore les anti-dépresseurs. Les substances connues sous le nom de « Endocrine disrupting compounds » (EDC) ou perturbateurs endocriniens sont supposées imiter, bloquer, stimuler ou empêcher l'activité des hormones naturelles trouvées dans le système endocrinien. Leurs origines sont diverses et incluent les produits pharmaceutiques, les produits de soins, de nettoyage domestique, les herbicides et pesticides, ou encore certaines hormones ou autres métaux.

Ces éléments naturels ou synthétiques ont été trouvés dans différentes eaux de surface et souterraines, et leur impact écologique a été démontré avec des concentrations très faibles (Kolpin et al., 2004). Blanca Jimenez de l'Université Autonome de Mexico mène une étude pour identifier l'effet des EDC. Dans ce cadre, elle a notamment pu comparer les eaux de Mexico avec celles de Berlin. Si certaines concentrations d'EDC sont similaires, d'autres traces de médicaments sont typiquement « mexicaines ». Pour expliquer ce phénomène, Jimenez invoque le coût des visites médicales : beaucoup de gens auraient recours à l'automédication et utiliseraient ainsi les mêmes médicaments que leurs voisins.

Différentes études révèlent que les stations conventionnelles de traitement d'eaux potable et usée ne sont pas capables d'enlever de nombreuses de ces substances. Les scientifiques restent cependant en désaccord sur la capacité des traitements avancés (charbon actif, oxydation avancée, osmose inverse) à éliminer la plupart de ces traces. Khan et Roser (2007) prétendent que l'osmose inverse et l'oxydation avancée sont des barrières hautement efficaces pour des substances récemment découvertes comme les hormones stéroïdiennes ou des molécules comme la NDMA (nitrosodiméthylamine) ou le 1,4-dioxane. Watkinson et al. (2007) par contre contestent ce constat en montrant que de faibles concentrations d'antibiotiques passent même à travers la microfiltration et l'osmose inverse. Ceci pose des questions sur la qualité de l'eau potable issue de la réutilisation des eaux usées, comme cela est pratiqué en Namibie ou à Singapour, et peut justifier un recours du législateur au principe de précaution – comme c'est le cas en France par exemple – qui lui seul permet de protéger la population des incertitudes qui règnent encore dans le domaine. Concernant les eaux usées non traitées des PVD, Jimenez (2006a) remarque que les sols contribuent à réduire les concentrations de ces substances, mais qu'il y a un risque particulier concernant les phtalates³⁶ dans les sols agricoles accumulés par infiltration d'eaux usées.

Mentionnons enfin que la méthodologie d'analyse, la détermination des impacts toxicologiques et l'élimination des traces de SPA et d'EDC sont autant de champs de recherche nouveaux et importants dans une perspective de réutilisation. Le projet de recherche européen « Knappe » (sur la période 2007-2008) qui est coordonné par l'Ecole des Mines d'Alès vise justement à réunir le maximum de connaissances sur le traitement et le comportement des résidus médicamenteux dans les eaux environnementales pour combler ainsi l'absence d'études ayant couvert l'ensemble de la chaîne de vie des médicaments. Le

³⁶ Si l'effet cancérogène de ce groupe de produits chimiques n'est pas avéré, des effets ont été démontrés en ce qui concerne les problèmes de fertilité ou de croissance chez les enfants exposés à de fortes doses en période prénatale ou néonatale. Les phtalates sont reconnus pour être des perturbateurs endocriniens.

projet réunit des producteurs comme Sanofi-Aventis et des opérateurs de gestion déléguée de services d'eau et d'assainissement comme la Saur (JDLE, 2007b). Concernant l'impact sur l'eau potable, le coordonnateur du projet note de façon pertinente qu'« il faudrait boire des litres d'eau chaque jour pour constater des effets immédiats sur la santé, mais on ne connaît pas aujourd'hui les effets à long terme pouvant entraîner, comme avec les antibiotiques, des phénomènes de résistance bactérienne ».

2. Risques environnementaux

La réutilisation d'eaux usées peut avoir des impacts environnementaux, dont nous allons mentionner uniquement les principaux. Les substances contenues dans les eaux usées traitées comme les nutriments, le sel ainsi que les matières organiques et inorganiques peuvent tous avoir des effets sur le sol et les plantes en cas d'irrigation. Ainsi, la concentration excessive de nitrates dans les sols peut considérablement réduire les rendements agricoles. Une salinité élevée des eaux usées peut nuire durablement à la structure des sols et la production agricole. Ces effets négatifs peuvent s'aggraver dans des sols avec une faible capacité de drainage et une évapo-transpiration élevée (AATSE, 2004)

En outre, des microorganismes contenus dans l'eau peuvent modifier les caractéristiques microbiologiques du sol ou avoir des effets pathogènes sur la végétation.

Concernant l'effet sur les eaux de surface, leur qualité peut être détériorée par le mélange avec des eaux usées retraitées. La charge de nutriments dans les eaux régénérées peut entraîner la formation d'algues dans les eaux d'accueil, limitant ainsi ses usages possibles. Des techniques d'irrigation efficace telles que l'arrosage en goutte-à-goutte ou souterrain peuvent néanmoins réduire l'écoulement des eaux régénérées.

L'effet d'autres substances chimiques, et notamment de résidus d'antibiotiques et d'autres médicaments usuels a lui aussi été démontré. Ainsi, la généralisation des pollutions pharmaceutiques serait, d'après le Conseil Supérieur de la Pêche, à l'origine de la féminisation de 40 % des gardons mâles de la Seine. Des travaux de recherche franco-britanniques sur des populations de gardons en Haute-Normandie et en Angleterre ont confirmé que le niveau de féminisation des gardons semblait directement relié à la qualité des effluents des stations d'épuration rejetés en rivière (pollution urbaine et industrielle)³⁷.

Les eaux souterraines quant à elles peuvent être contaminées par des nitrates que l'on trouve généralement dans les eaux régénérées ou par des métaux lourds surtout présents dans les eaux usées industrielles. La contamination dépend néanmoins des caractéristiques du site, du sol et de l'hydrogéologie.

Mais les eaux régénérées peuvent aussi affecter les écosystèmes environnants par la modification des cours d'eau et de la qualité des eaux. Ceci s'applique en particulier aux rivières transportant partiellement ou majoritairement des eaux usées. D'un autre côté, l'eau régénérée peut aussi servir à remplir certaines conditions de débit d'étiage pour protéger l'écosystème aquatique ou certaines activités en aval.

Enfin, les expériences australiennes de systèmes à double canalisation d'Adélaïde ou les nouveaux clubs avec golf visités à San Luis Potosí au Mexique démontrent que la réutilisation peut promouvoir la croissance urbaine et changer les schémas de développements résidentiel, industriel, municipal ou agricole. L'eau régénérée a inspiré le nom de la zone résidentielle de Mawson Lakes construite autour de lacs artificiels. De même, la réutilisation d'une partie des effluents de San Luis Potosí a permis le développement d'un terrain de golf et d'espaces de verdure et doit aussi assurer l'alimentation des nouvelles résidences autour des « greens ».

³⁷ Source: « Le médicament, du malade à l'eau potable ». Revue de Presse de l'Association pour la Contrat Mondial de l'Eau (ACME) des 22 et 23 septembre 2006 : <http://www.acme-eau.org/>

N'oublions cependant pas le clivage entre pays développés et PVD qui s'applique aussi dans le cas des impacts environnementaux de la réutilisation d'eaux usées (non traitées). Jimenez (2005) étudie les effets secondaires de la réutilisation dans la vallée de Tula au Mexique. S'il est évident que l'utilisation de ces effluents augmente les rendements agricoles, les prix fonciers et les revenus des agriculteurs (entre 6 et 63% de plus que pour des cultures irriguées avec de l'eau « propre »), celle-ci a aussi des effets sur les sols, les cultures et la zone souterraine.

L'ajout de matières organiques a augmenté la capacité de stockage d'eau et l'humidité des sols. Les concentrations de métaux lourds (Pb, Cd, Cu, Zn) ont été multipliées par 3 à 6 en 80 ans, sans dépasser pour autant les seuils internationaux. Sur cette même période, le contenu en phosphore est passé de 2-9 g/m² à 14-25 g/m² (Siebe et Cifuentes, 1995), tandis que la concentration d'azote n'a qu'augmenté modestement, à cause de sa solubilité importante.

L'ajout d'environ 195 kg/ha*an de nitrogène et de 81 kg/ha*an de phosphore a permis d'augmenter la productivité entre 67 et 150% selon les cultures (par rapport à une irrigation à l'eau de premier usage). Si l'absorption de métaux lourds par les plantes reste faible, on a pu vérifier des teneurs accrues de nickel dans l'avoine et les courgettes, et de cadmium dans des légumes tels que les navets ou les épinards.

Enfin, on observe que l'infiltration des eaux usées dans les sols permet d'éliminer certaines pollutions et notamment tous les oeufs d'helminthe, mais augmente la salinité et le contenu en nitrates de l'aquifère.

A titre récapitulatif, le tableau suivant issu des orientations nationales australiennes sur la réutilisation des eaux usées (NRMCC, 2006) fait la liste des risques principaux ainsi que leurs effets connus sur l'environnement :

Effet ou impact	Description	Exemples d'impact sur l'environnement
Concentration	Augmentation de la quantité d'une substance dans l'eau régénérée, par évaporation ou ajout d'eau régénérée à une autre eau	Augmentation de la salinité ou de la concentration d'autres substances dans l'eau pour des barrages peu profonds qui gardent l'eau régénérée longtemps
Contamination	Concentration croissante de substances non désirées dans des récepteurs finaux (sols, eaux, plantes)	Concentration de cadmium dans les sols entraînant une contamination de certaines cultures agricoles qui doivent alors être interdites à la consommation humaine
Eutrophisation	Enrichissement en nutriment (typiquement nitrates ou phosphates) entraînant plus de productivité	Explosion de la croissance d'algues dans des écosystèmes aquatiques, faisant de l'ombre aux organismes dépendant de la lumière : décharge de toxines dans l'eau, baisse du niveau d'oxygène, destruction de certaines plantes et perte de biodiversité

Effet ou impact	Description	Exemples d'impact sur l'environnement
Perte de biodiversité	Mortalité d'espèces originelles entraînant une perte de diversité des écosystèmes, des espèces et des gènes	Concentration en phosphore détruisant la végétation existante dans des cours d'eau pauvres en nutriment par la concurrence d'algues
Déséquilibre nutritionnel	Approvisionnement déséquilibré des plantes en nutriments minéraux créant des dysfonctionnements et des toxicités	Suralimentation en nitrogène causant une croissance végétative excessive, réduisant celle des fruits ou retardant le mûrissement
Odeur	Odeur désagréable	Cours d'eau stagnants riches en nutriments causant de mauvaises odeurs
Empoisonnement et maladie	Insecte ou animal détruisant des plantes ou maladie affectant des plantes ou animaux	Empoisonnement et maladie due au microclimat humide autour de plantes arrosées avec de l'eau régénérée
Salinité	Présence de sels solubles dans les sols et l'eau. La conductivité électrique et la concentration totale en sels dissous sont des indicateurs de salinité.	Salinité dans les sols réduisant la croissance des plantes ou créant un stress hydrique pour elles (elles fanent)
Concentration en sodium	Sols avec des teneurs excessives en sodium échangeable (>6%) résultant dans un affaiblissement du sol	L'irrigation avec une eau riche en sodium par rapport au calcium et au magnésium peut rendre un sol pauvre en sels sodique. Les plantes y ont plus de mal à étendre leurs racines et peuvent souffrir du délavage et de manque d'oxygène.
Toxicité	Capacité d'une substance à nuire ou à détruire des plantes et d'autres organismes, surtout par des moyens chimiques	Signes de toxicité du bore sur des plantes sensibles, même si ces signes sont généralement précédés par une réduction de croissance et de récolte : p.ex. jaunissement ou points marrons sur les vieilles feuilles
Délavage	Saturation du sol en eau	Augmentation du niveau de la nappe phréatique à moins de 2 m sous la surface du sol dans la zone d'enracinement des plantes

3. Facteurs organisationnels et humains

D'un point de vue scientifique et technique, on peut opposer à tous les risques présentés jusqu'ici que des solutions technologiques peuvent être déployées pour répondre aux défis posés par la réutilisation des eaux usées. Restent les « facteurs organisationnels et humains » de risque que l'on n'a commencé à étudier – dans le domaine des risques industriels – que depuis quelques décennies, notamment à cause de la survenue d'incidents et d'accidents marquants dans des installations aux technologies éprouvées, lesquels se sont produits principalement du fait d'erreurs humaines et/ou d'une organisation inadaptée. Ceci vaut pour la catastrophe de Bhopal en 1984 liée à la mauvaise organisation de la maintenance et une connaissance insuffisante de l'installation par ses opérateurs. Ceci vaut aussi, dans le domaine de l'industrie nucléaire, pour les accidents de Three Mile Island (1979, fusion du coeur d'un réacteur à eau sous pression) et de Tchernobyl (1986, explosion d'un réacteur nucléaire) qui ont mis en évidence, à des niveaux de gravité différents, l'importance de l'ergonomie de la salle de commande et de la « culture de sûreté » des équipes chargées de l'exploitation des réacteurs.

Don Bursill, ancien directeur de la Recherche du Développement pour South Australian Water, souligne l'importance cruciale des facteurs organisationnels et humains dans le domaine de l'eau. C'est pour cette raison que la réutilisation potable ne devrait être envisagée, selon lui, qu'en ultime recours.

Bursill est rejoint dans son hypothèse centrale par les résultats de « Safe Drinking Water » (Hudrey et Hudrey, 2005) qui étudie 98 épidémies liées à l'eau dans 15 pays développés. L'étude montre que :

- 80% des causes d'accidents sont dues à des erreurs humaines ou de gestion et non à des faiblesses de la technologie en place.
- La majorité des incidents s'est produite là où des effluents d'origine humaine et/ou des déchets d'origine animale ont été rejetés dans les sources du système d'approvisionnement en eau.
- Les systèmes de surveillance sanitaires ne sont pas réactifs. Ils ont été le plus souvent utilisés a posteriori pendant les enquêtes.
- Les problèmes identifiés incluent la mauvaise maintenance, la réduction de coût inappropriée, le manque de prise de conscience de l'importance de la qualité de l'eau, la formation insuffisante voire l'incompétence du personnel, l'absence de plans d'action, le manque d'information du régulateur et le manque de réactivité de celui-ci ainsi que l'occultation des résultats.

Un exemple flagrant est l'incident de Walkerton (Ontario, Canada). La ville avait connu une longue histoire d'exploitation de mauvaise qualité, démontrée par l'absence d'indicateurs de surveillance. Différentes sources d'eau étaient notamment connectées au système d'approvisionnement en eau potable, sans désinfection préalable (ce qui allait certes à l'encontre de la licence d'exploitation, mais aucun contrôle n'était effectué). En 2000, après des pluies torrentielles, des bactéries se sont infiltrées dans le réseau, infectant plus de 2.300 personnes et en tuant sept. Une enquête trouva ensuite que les mesures de chlore résiduel avait été renseignées dans le système de surveillance pour des dates futures. D'autres données de surveillance n'avait pas été communiquées aux autorités sanitaires, et le laboratoire sous-traitant ne connaissait pas ses obligations de transmission d'information au régulateur. Le coût de cet accident a été estimé à environ USD 270 millions. Qui plus est, 11 mois après, alors que l'enquête sur Walkerton était en cours, entre 6.000 et 7.000 cas de cryptosporidiose

sont apparus à North Battleford, également en Ontario (Canada), à cause du traitement imparfait de la station de traitement des eaux, dont le système de surveillance avait pourtant déjà révélé en 1993 un pic de 1,5 millions (!) d'E.coli/l dans l'eau en sortie de STEP, ignoré aussi bien par l'exploitant que l'autorité de contrôle. Enfin, l'accident même de Milwaukee en 1993 (400.000 infections, 100 victimes) causé par *Cryptosporidium* n'était pas du tout apparu sur les écrans de contrôle des autorités sanitaires, parce que ce protozoaire était alors relativement nouveau et la technologie de surveillance inadaptée pour ce risque. Il a ainsi fallu attendre le signal d'alarme d'un pharmacien qui avait épuisé son stock de produits contre la diarrhée pour se rendre compte de l'évènement !

Une erreur sans conséquence a été révélée dans le cas du système de double réseau (eau potable, eau régénérée) à Mawson Lakes proche d'Adélaïde (Australie du Sud). Pour une maison, le compteur d'eau régénérée a été placé sur la conduite d'eau potable, tandis que le compteur d'eau potable était placé sur la conduite d'eau régénérée (de qualité quasi-potable). L'erreur n'a pas été constatée pendant plusieurs années, jusqu'à une coupure du réseau d'eau régénérée, lors de laquelle le ménage en question s'est plaint de ne plus avoir d'eau au robinet, alors que tous les voisins se n'avaient eux plus d'eau dans les toilettes. Là encore, l'erreur a été possible, malgré trois audits préalables par la société exploitante pour s'assurer que les connexions avaient été effectuées correctement. Selon le Département de Santé du New South Wales (Australie), ce risque de « connexions croisées » représente le principal obstacle à la réutilisation d'eaux usées à l'intérieur de la maison.

Tous ces incidents se sont réellement produits suite à des erreurs humaines et organisationnelles et peuvent encore se répéter. C'est pourquoi des progrès importants doivent être faits dans tous les pays pour :

- Renforcer les démarches « qualité » des exploitants (questionnement, formalisation et contrôle des pratiques) ;
- Gérer activement les compétences (habilitation du personnel, évaluation individuelle, formation continue) ;
- Analyser systématiquement les causes humaines des incidents et favoriser le retour d'expérience d'autres exploitants ;
- Prendre en compte les aspects humains et organisationnels dans l'analyse des risques préalable aux activités sensibles (opérations inhabituelles comme le test de nouveaux réactifs dans une STEP, travaux).

Seules ces mesures permettront de mettre fin au « paradoxe de la gestion de l'eau » que déplore Bursill. Bien qu'étant un service public important voire vital pour la santé des populations, la gestion est encore trop mollement régulée dans de nombreux pays. C'est ainsi qu'il n'y a par exemple aucune exigence formelle pour les qualifications d'un opérateur de STEP en Australie du Sud, ce qui explique qu'aujourd'hui, la plupart de ces opérateurs sont d'anciens électriciens ou plombiers.

III) Législation

1. OMS³⁸

Le premier rapport de l’OMS sur l’utilisation des eaux usées et excréments pour l’agriculture et l’aquaculture date de 1973. Ce premier ouvrage fut remanié en 1989 après une revue complète d’études épidémiologiques. La dernière version datant de 2006 intègre le cadre conceptuel dit « de Stockholm ».

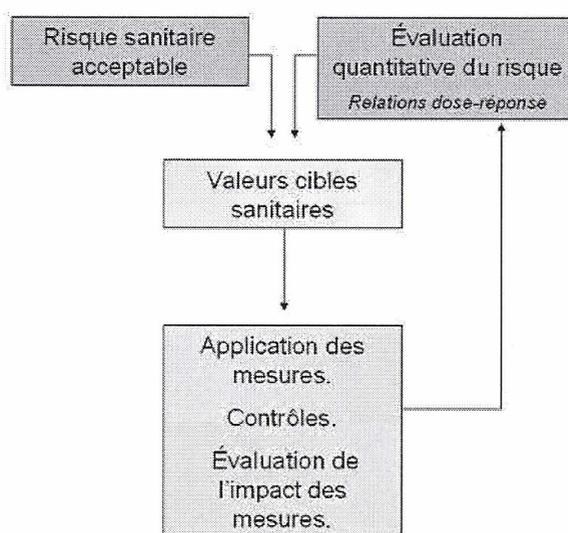
a) Le cadre conceptuel « de Stockholm »

Le cadre de travail de Stockholm est une approche intégrée qui combine évaluation et gestion du risque pour contrôler les maladies d’origine hydrique. Bien qu’établi pour les maladies contagieuses, il peut s’appliquer aux maladies dues aux éléments chimiques toxiques contenus dans l’eau. Les recommandations de l’OMS (2006) pour la réutilisation d’eaux usées sont basées sur ce cadre conceptuel.

Le risque sanitaire socialement acceptable peut être quantifié par la notion de « DALY » (Disability Adjusted Life Years) qui mesure le raccourcissement de l’espérance de vie ou le handicap dus à une maladie étudiée. Pour ce dernier, c’est la durée moyenne du handicap multipliée par un facteur de gravité variant de 0 (santé parfaite) à 1 (mort) qui est prise en compte : la diarrhée hydrique est par exemple affectée d’un facteur de gravité de 0.09 à 0.12 en fonction de l’âge. L’OMS opte pour un risque de 1µDALY (soit 10⁻⁶ DALY) par an et par personne pour une utilisation donnée d’eau régénérée (fixant les conditions, la quantité typique en jeu, ...), ce qui correspond à la valeur adoptée pour

ses recommandations de 2004 pour l’eau potable. Il est néanmoins mentionné dans le rapport que cet objectif peut être trop ambitieux pour certains pays en développement – car trop cher, même pour l’irrigation restreinte. Dans ce cas, la cible pourrait être diminuée dans un premier temps à 10⁻⁴ ou 10⁻⁵ DALY, pour progressivement monter au seuil préconisé de 1µDALY. De manière similaire, un pays développé pourrait opter pour un objectif plus ambitieux, comme 10⁻⁷ DALY.

La démarche consiste ensuite, en combinant des estimations de concentrations de pathogènes présents dans les eaux usées d’une part, et de relations « doses- réponses » liant la concentration d’un pathogène avec le risque sanitaire qu’il engendre d’autre part, de



³⁸ Source pour ce chapitre : OMS, 2006

déterminer la réduction, exprimée en termes logarithmiques, de ce dernier à effectuer avant utilisation. Les relations doses-réponses sont issues de la littérature internationale détaillant les contaminations engendrées par une présence mesurée de pathogènes ; il doit être souligné cependant que la recommandation pour les œufs d'helminthe n'est pas basée sur une évaluation quantitative du risque jusqu'ici par manque, principalement, de données fiables des DALYs associés à une telle contamination.

Le document de l'OMS poursuit ensuite la description de la démarche en proposant des indicateurs dont les concentrations devront être suivies pour assurer la constance de la qualité des eaux usées traitées dans le temps, et le retour d'expérience permettant de faire bénéficier le procédé des résultats acquis.

b) Une nouvelle approche

L'approche conceptuelle a donc évolué (Blumenthal et al., 2000) depuis les premières recommandations de 1989 : alors qu'il s'agissait **autrefois de définir des concentrations qui supprimeraient le risque supplémentaire mesurable** attribuable à la réutilisation d'eaux usées, en se basant sur des preuves scientifiques, et plus particulièrement des études épidémiologiques, il s'agit d'abord **aujourd'hui de définir un risque acceptable, puis de conjuguer des données d'expositions à des courbes doses-réponses pour définir les seuils de concentrations**. Cette technique est en particulier très intéressante quand le risque acceptable est plus faible que ce que des études épidémiologiques peuvent détecter. D'après (61), ce cadre conceptuel ne trouve d'écho national qu'en Australie pour l'instant.

Recommandations de l'OMS (2006)

Scénario d'exposition	Cible sanitaire (en DALY /pers/an)	Qualité de l'eau (E.coli /100mL d'eaux usées ou /100g de sol)	Réduction logarithmique requise pour le Rotavirus ³⁹	Nombre d'œufs d'helminthe par litre (moyenne arithmétique)
Irrigation sans restriction :	$\leq 10^{-6}$			
<i>Laitue</i>		$10^3 - 10^4$	6	≤ 1 (si âge ≥ 15 ans)
<i>Oignon</i>		$10^3 - 10^4$	7	≤ 1 (si âge ≥ 15 ans)
Irrigation restreinte :	$\leq 10^{-6}$			
<i>Agriculture très mécanisée</i>		10^5	3	≤ 1 (si âge ≥ 15 ans)
<i>Intense en main d'oeuvre</i>		$10^3 - 10^4$	4	≤ 1 (si âge ≥ 15 ans)
Irrigation goutte-à-goutte :	$\leq 10^{-6}$			
<i>Cultures hautes (pas de ramassage depuis le sol)</i>		10^5	2	Pas de recommandation
<i>Cultures basses</i>		10^3	4	≤ 1 (si âge ≥ 15 ans)

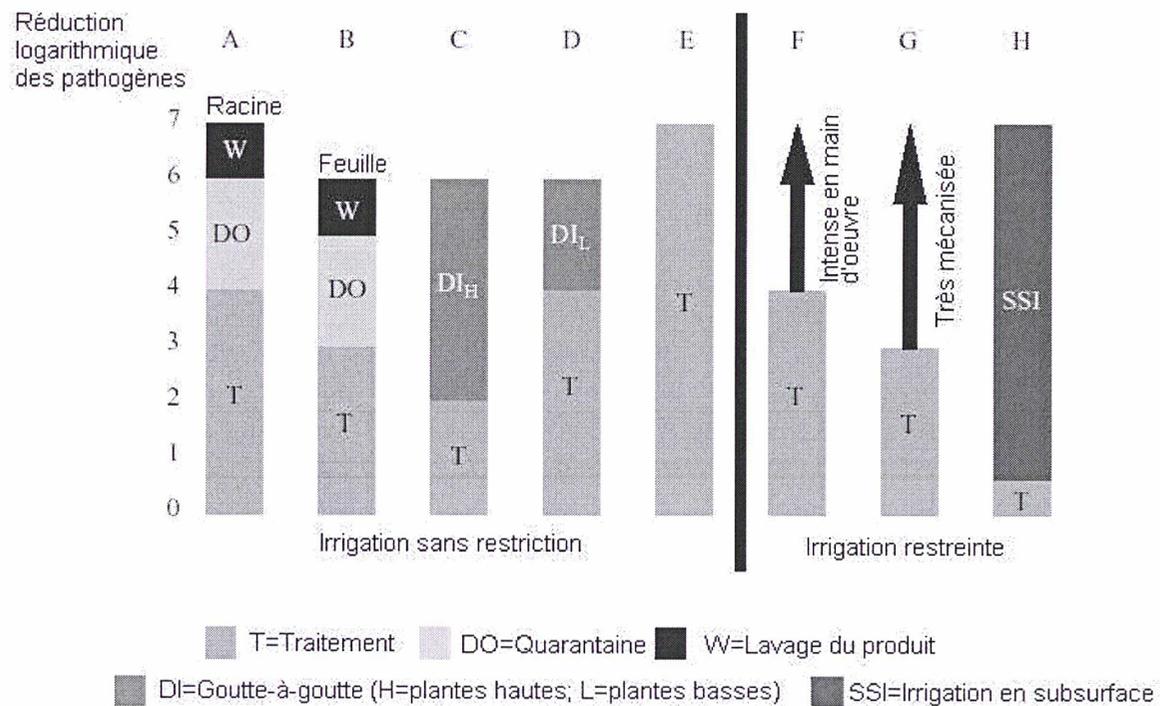
L'OMS fixe aussi des seuils de concentration dans le sol d'éléments chimiques et de composés organiques.

³⁹ Les risques estimés pour *Campylobacter* et *Cryptosporidium* sont plus faibles.

La concentration des œufs d'helminthe n'a pas été établie à partir d'une démarche de quantification du risque microbiologique, par manque de données crédibles sur les risques d'infections et les DALYs en résultant. Une récente étude de B. Jimenez, devant être présentée en juin 2007, remédierait à la situation⁴⁰.

Il est important de noter que l'OMS propose une série de mesures qui, en sus du traitement conventionnel à la station d'épuration, permettent d'atteindre la cible de 10^{-6} DALYs par personne et par an. Par exemple :

- Laver les salades et autres légumes avant leur consommation permet de diminuer la concentration de pathogènes d'un log ;
- Ne pas manger ces derniers immédiatement permet de réduire la concentration d'un nombre de logs approximativement égal au nombre de jours de quarantaine ;
- L'irrigation en goutte-à-goutte ou en subsurface diminue aussi les risques.



⁴⁰ Source : Entretien avec B. Jimenez

2. Australie⁴¹

La réglementation nationale australienne forme un ensemble de recommandations indicatives qui doivent ensuite être reprises par chaque Etat. Elle s'inspire du modèle de risque de l'OMS, et établit notamment un objectif de 10⁻⁶ DALYs par personne et par an.

Le rapport établit 12 piliers fondamentaux pour gérer la qualité et l'utilisation d'eaux usées régénérées, que sont :

- l'engagement à un usage et une gestion responsable des eaux usées réutilisées,
- l'évaluation du système de réutilisation,
- les mesures préventives de gestion,
- les procédures opérationnelles et de contrôle,
- la vérification de la qualité de l'eau régénérée et du respect environnemental,
- la gestion des incidents et des urgences,
- l'entraînement et la sensibilisation de l'opérateur, de l'entrepreneur et de l'utilisateur final,
- l'implication et la sensibilisation du public,
- la validation des processus et l'activité de recherche et développement,
- la documentation et le reporting,
- l'évaluation et l'audit, et
- la revue et l'amélioration continue.

a) Evaluation du système

Il est intéressant que le deuxième pilier développe un système d'évaluation du risque très semblable à celui caractérisant les risques industriels en France par les deux critères de la probabilité d'occurrence et la gravité de l'évènement risqué. Ces deux axes d'études sont détaillés dans la réglementation, la gravité englobant risque sanitaire et environnemental.

Probabilité/Risque	Insignifiant	Mineur	Modéré	Majeur	Catastrophique
Rare	<i>Faible</i>	<i>Faible</i>	<i>Faible</i>	<i>Haut</i>	<i>Haut</i>
Improbable	<i>Faible</i>	<i>Faible</i>	<i>Modéré</i>	<i>Haut</i>	<i>Très haut</i>
Possible	<i>Faible</i>	<i>Modéré</i>	<i>Haut</i>	<i>Très haut</i>	<i>Très haut</i>
Probable	<i>Faible</i>	<i>Modéré</i>	<i>Haut</i>	<i>Très haut</i>	<i>Très haut</i>
Presque certain	<i>Faible</i>	<i>Modéré</i>	<i>Haut</i>	<i>Très haut</i>	<i>Très haut</i>

Le but est alors de réduire tous les risques au niveau faible, en commençant par ceux évalués initialement à « haut » et « très haut ». Les risques « très hauts » seront en général ceux sur lesquels les points de contrôles critiques seront concentrés (voir ci-dessous).

En ce qui concerne l'aspect environnemental, neuf risques ont été identifiés comme prioritaires et concernant des utilisations spécifiques d'eaux usées régénérées. Ils comprennent le bore, le cadmium, les résidus de désinfection par chloration, la saturation des sols en eau, l'azote, le phosphore, la salinité, les chlorures, et le sodium. Neuf risques

⁴¹ Source pour ce chapitre: Natural Resource Management Ministerial Council (NRMMC), 2006

supplémentaires ont été listés pour l'allocation d'eau régénérée aux masses d'eau naturelles, à savoir l'ammoniaque, l'aluminium, l'arsenic, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel, les surfactants et le zinc.

b) Les mesures préventives de gestion

Le troisième pilier comprend la description des actions préventives et des barrières multiples, ainsi que des points de contrôle critiques.

Les actions préventives incluent :

- la protection de la source d'eau (e.g. éviter les rejets industriels),
- le traitement,
- le stockage et l'infiltration,
- la protection et la maintenance (e.g. minimisation de la lumière pour éviter la croissance des algues, le contrôle des connections croisées),
- les restrictions sur les modes de distribution et les sites d'utilisation (e.g. des codes de couleurs pour la plomberie, signalétique),
- les utilisateurs d'eaux usées régénérées (programmes de sensibilisation).

Les barrières multiples permettent d'éviter une perte complète de contrôle du système de gestion des eaux usées régénérées si l'une d'entre elles vient à céder. Il est de plus parfois possible d'augmenter la performance des barrières restant opérationnelles temporairement en attendant la restauration de la barrière défectueuse. Enfin, les barrières multiples ont généralement une performance globale plus stable que les barrières uniques.

Le projet du pipeline de Virginia comporte par exemple les barrières suivantes :

- traitement primaire,
- traitement secondaire (boues activées),
- rétention lagunaire,
- coagulation ; flottation-filtration,
- désinfections,
- contrôles sur le site,
- formation des utilisateurs finaux.

Les points de contrôle critiques nécessitent de définir des grandeurs pouvant être mesurées, qui plus est de manière suffisamment régulière pour mettre à jour un dysfonctionnement à temps. Des mesures correctives doivent être définies comme réponse à des déviations par rapport au fonctionnement normal. Quelques exemples de points de contrôle critiques sont donnés ci-dessous :

Point de contrôle critique potentiel	Risque	Limite critique potentielle	Suivi	Action corrective
<i>Rétention lagunaire d'eau usée régénérée</i>	Bactéries entériques, virus et protozoaires	Temps de rétention minimum de 50 jours (critère cible de 45 jours)	Suivi de l'écoulement	Identifier l'origine du problème, diminuer la turbidité de l'eau filtrée, augmenter la chloration, stopper la distribution
<i>Dessalement</i>	Chlorures et	175mg/l de Cl et	Contrôle continu	Dévier l'eau

	phytotoxicité du sodium	115mg/l de Na pour protéger les plantes sensibles où l'eau est arrosée par des sprinklers aériens (contact avec les feuilles)	de la conductivité électrique comme substitut pour les concentrations de Na et Cl	régénérée vers une zone d'eau non traitée et identifier l'origine du problème
--	-------------------------	---	---	---

c) Concentrations limites et diminution du risque

Les traceurs choisis sont *Campylobacter* pour les bactéries, le Rotavirus (et l'Adénovirus) pour les virus, et le *Cryptosporidium parvum* pour les protozoaires et les helminthes. La réglementation établissant des log réductions de ces pathogènes contenus dans les eaux usées, il est mentionné que ceux-ci sont - au 95^{ème} percentile choisi pour évaluer le risque et d'après deux projets australiens - respectivement présents à des concentrations inférieures à 7000, 8000 et 2000 par litre. Les valeurs suivantes correspondent à 10⁻⁶ DALYs par personne et par an.

Utilisation \ Log-Réductions		Cryptosporidium	Rotavirus	Campylobacter
Cultures Commerciales		4.8	6.1	5.0
Double réseau	<i>Arrosage du jardin</i>	4.4	5.8	4.6
	<i>Arrosage de cultures consommables</i>	4.0	5.3	4.2
	<i>Usage interne à l'habitat seulement</i>	4.7	6.1	4.8
	<i>Tous usages</i>	4.9	6.3	5.1
Irrigation municipale		3.7	5.2	4.0
Double réseau + irrigation municipale		5.0	6.4	5.1
Lutte incendie		5.1	6.5	5.3

Elle sont ensuite faiblement arrondies dans les recommandations du document, et assorties d'un objectif de concentration en E.coli : pour le double réseau, celle-ci doit être inférieure à 1 CFU/100mL ; de même que pour les cultures commerciales consommées crues ou non traitées.

Il est souligné que ces diminutions peuvent être atteintes non seulement par le traitement, mais aussi par des mesures préventives dont quelques unes sont listées ci-dessous :

Mesure de contrôle	Log-réduction de pathogènes
<i>Produits cuisinés ou traités (céréales, vin)</i>	5 à 6
<i>Epluchage</i>	2
<i>Goutte-à-goutte</i>	2

<i>Goutte-à-goutte avec contact limité ou nul des cultures avec sol (eg tomates)</i>	3
<i>Goutte-à-goutte avec aucun contact des cultures avec le sol (eg pommes, raisin, abricots)</i>	5
<i>Quarantaine</i>	0,5/jour
<i>Quarantaine pendant irrigation de parcs ou terrains de sport (1 à 4 heures)</i>	1
<i>Contrôle de la dérive des sprays (microsprinklers, sprinklers dirigés vers l'intérieur, ...)</i>	1
<i>Irrigation de subsurface (herbe, ...)</i>	5 à 6
<i>Pas d'accès au public pendant l'irrigation</i>	2
<i>Zones tampons (25-30 m)</i>	1

d) Situation dans l'état du Queensland⁴²

Comme décrit dans le projet du Western Corridor, l'Etat du Queensland envisage la réutilisation potable indirecte. Il inclut donc les log-réductions nécessaires pour produire de l'eau potable à partir d'eaux usées :

Réutilisation potable	
<i>Cryptosporidium</i>	8
<i>Virus entériques</i>	9.5
<i>Campylobacter</i>	8.1

La législation liste aussi de manière très complète 238 produits, et leurs concentrations limites dans une eau potable. La liste contient des antibiotiques, des anti-inflammatoires, des composés œstrogéniques et androgéniques, et des bloquants bêta adrénérgiques, entre autres.

⁴² Source : NRMCC/EPHC, 2007

3. Mexique⁴³

La réglementation mexicaine croise trois types de milieux récepteurs d'eaux usées régénérées (rivières, réservoirs naturels et artificiels, et sols) avec 5 groupes d'usages possibles de ces eaux (eau potable, protection écologique, conservation des marécages, agriculture irriguée et décharge des eaux usées) pour définir les valeurs limites. Les traceurs microbiens de l'OMS (1989) – coliformes fécaux et œufs d'helminthe -, et la valeur limite pour le premier a été suivie. Pour les métaux lourds, la réglementation EPA (1992) fut adoptée.

Paramètres (mg/l sauf si mention contraire)	Rivières		Réservoirs naturels et artificiels		Sols	
	Valeurs pour une réutilisation agricole					
	Moyenne journalière	Moyenne mensuelle	Moyenne journalière	Moyenne mensuelle	Moyenne journalière	Moyenne mensuelle
Température (°C)	N/A	N/A	40	40	N/A	N/A
Graisse et huiles	15	25	15	25	15	25
Solides décantables (ml/l)	1	2	1	2	N/A	N/A
TSS (Matières en suspension)	150	200	75	125	N/A	N/A
BOD ₅ (Demande biochimique en oxygène 5)	150	200	75	150	N/A	N/A
Azote total	40	60	40	60	N/A	N/A
Phosphore total	20	30	20	30	N/A	N/A
Coliformes fécaux (UFC/100ml)	10 ³	10 ³	10 ³	10 ³	10 ³	10 ³
Œufs d'Helminthe pour une agriculture sous restriction – pas de consommation des produits crus (Nb/l)	5	5	5	5	5	5
Œufs d'Helminthe pour une agriculture sans restriction (Nb/l)	1	1	1	1	1	1

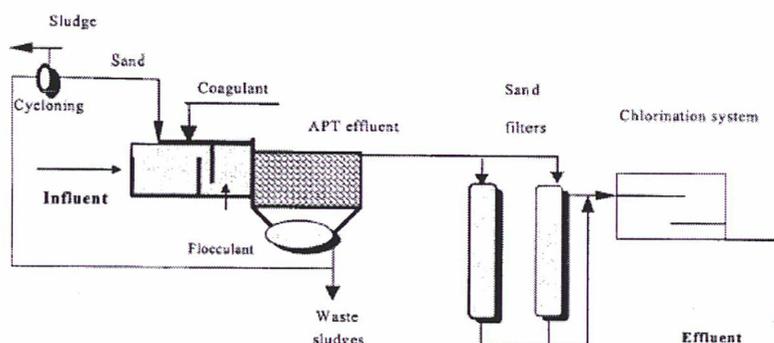
L'aspect le plus important concerne la limite de concentration des œufs d'helminthe, qui a été définie comme basée sur une technologie économiquement viable pour le pays.

L'option du lagunage, la plus efficace pour se débarrasser des œufs d'helminthe d'après la littérature du moment, a été rejetée étant donnés les débits très importants en jeu (52 à 75 m³/s). Il a été alors décidé de collecter des données des stations existantes au Mexique, et il

⁴³ Source pour ce chapitre : B. Jimenez, 2005

apparus qu'aucune ne respectait la limite d'un œuf d'helminthe par litre (les concentrations s'éparpillant entre 3 à 15 œufs/l) : la technologie traditionnelle destinée à éliminer la matière organique n'était donc pas appropriée pour ces parasites.

L'« Advanced Primary Treatment » (APT), basé sur la coagulation floculation, ne nécessite que de faibles doses de coagulant pour éliminer les solides. Il est donc peu cher, et génère peu de boues. Utilisant un système de sédimentation rapide, il nécessite un temps de détention faible, de 30 à 60 minutes.



Source : *Alternative Treatment for Wastewater Destined for Agriculture Use*, Jimenez et al., 1999

Il fut aussi démontré que la concentration d'œufs d'helminthe était relativement proportionnelle à la quantité de matières en suspension : un procédé enlevant les solides en suspension réduirait donc la concentration des parasites en laissant la matière organique et les nutriments – dont on démontre qu'ils augmentent la productivité agricole⁴⁴ – dans la phase soluble ou parmi les particules fines non éliminées. De fait, les concentrations en azote et phosphore de l'effluent traité étaient suffisantes par rapport au besoin des agriculteurs de la vallée de la Tula. Les performances et coûts des traitements mentionnés figurent ci-dessous. Il fut enfin remarqué qu'une désinfection était nécessaire pour respecter la limite en coliformes fécaux.

	Influent	APT	Filtration	Désinfection (chloration)
Œufs d'Helminthe (œufs/l)	24.8	1.2	0.28	
Coliformes fécaux (MPN/100mL)	6.5×10^8	2.2×10^7	3.2×10^7	3.4×10^2
TSS (mg/l)	354	27	15.6	10
TKN (mgN/l)	21.7	18.3	12.0	11.5
TP-P (mgP/l)	8.7	3.3	2.3	2.1
Total COD (mgO ₂ /l)	460	198	144	104

Source : *Alternative Treatment for Wastewater Destined for Agriculture Use*, Jimenez et al., 1999

	Œufs d'helminthe (œufs/l)	Réduction des TSS (%)	Réduction de la COD (%)	Coût (US \$/m ³)
APT	1-3	85-90	50-65	0.03
APT avec filtration	<1	90-95	55-70	0.05
Boues activées	1-8	90-95	90-95	0.15

⁴⁴ Voir le chapitre sur les externalités.

	Œufs d'helminthe (œufs/l)	Réduction des TSS (%)	Réduction de la COD (%)	Coût (US \$/m³)
<i>Boues activées avec filtration</i>	<1	95-97	95-99	0.18

La recherche dans le domaine de la réutilisation des eaux usées au Mexique poursuit aujourd'hui cette approche, décrite précédemment lors du choix de l'APT, qui privilégie économie des systèmes et conservation des externalités positives - comme la concentration des nutriments dans les eaux usées traitées destinées à irriguer des champs. Une étude récente Jimenez et al., 2006) montre par exemple qu'il est à la fois moins cher (trois fois moins de coagulants et 7,8 fois moins d'énergie requise) et plus efficace (0,4 œuf d'helminthe par litre au lieu d'1,2) de suivre la distribution de taille des particules que la concentration de MES dans des effluents traités pour une réutilisation agricole, tout en conservant les nutriments bénéfiques à l'agriculture.

4. Maroc⁴⁵

Il n'y a pas actuellement de réglementation environnementale ou sanitaire encadrant la réutilisation des eaux usées au Maroc. La Loi sur l'eau de 1995 précise que la réutilisation agricole d'effluents traités est interdite si elle ne correspond pas aux standards établis par des canaux légaux. Ces standards seraient en train d'être établis par le Comité des Normes et Standards : le projet de loi limiterait à 5000 UFC/100mL la concentration en coliformes fécaux pour l'irrigation (1000 UFC/100mL pour les cultures consommées crues), et n'autoriserait pas d'œufs d'helminthe détectable.

Le pilote de réutilisation agricole de Drarga précédemment décrit devait aider le gouvernement marocain à définir de telles normes. Tant que celles-ci ne seront pas établies clairement, plusieurs projets ne verront pas le jour – c'est par exemple le cas à Agadir⁴⁶.

⁴⁵ Source pour ce chapitre : FAO et OMS, 2003

⁴⁶ Source : Entretien avec la régie d'Agadir (RAMSA).

5. USA : Californie

Nous avons souhaité inclure dans cette revue des législations sur la réutilisation des eaux usées celle qui est réputée être l'une des plus strictes au monde : il s'agit du « Title 22 » californien (California Code of Regulations, Title 22, Division 4, Chapter 3 : Water recycling criteria). Ce standard fut revu en 2000, pour obtenir la forme suivante⁴⁷ :

Utilisations	Tertiaire désinfectée	Secondaire désinfectée-2.2	Secondaire désinfectée -23	Secondaire non désinfectée
Toutes les utilisations autres que potable, de préparation de nourriture ou de recharge de nappe (régulées par d'autres lois)	Autorisée	Interdite	Interdite	Interdite
Irrigation de parcs, terrains de jeux, cours d'école, cours résidentielles et cours de golf associés à des résidences	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Interdite	Interdite	Interdite
Cours de golf à accès restreint, cimetières, aménagements paysagers d'autoroutes	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Interdite
Végétation non comestible et autres endroits avec une exposition au public limitée ^a	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Interdite
Gazon	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Interdite
Plantes ornementales ou commerciales	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Interdite
Toutes cultures alimentaires	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Interdite	Interdite	Interdite
Cultures alimentaires au-dessus du sol et pas en contact avec l'eau régénérée	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Goutte-à-goutte ou surface	Interdite	Interdite
Fourrage (luzerne), fibres (coton), et autres graines qui ne sont pas consommés par des humains	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Goutte-à-goutte ou surface
Vergers et vignes ne portant pas d'aliments	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Goutte-à-goutte ou surface	Goutte-à-goutte ou surface	Goutte-à-goutte ou surface
Vergers et vignes ne portant pas d'aliments pendant l'irrigation	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Goutte-à-goutte ou surface
Arbres de Noël et autres arbres ne portant pas d'aliments	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Goutte-à-goutte ou surface
Cultures alimentaires devant subir un traitement commercial éliminant les pathogènes avant consommation (e.g. betteraves à sucre)	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Spray, goutte-à-goutte ou surface	Goutte-à-goutte ou surface

⁴⁷ D'après le résumé de (Achilleos et al., 2005)

a Les effluents secondaires désinfectés-2.2 et -23 sont utilisables pour l'irrigation d'aménagements paysagers et de plantes non comestibles où (i) le public aurait un accès et une exposition à l'eau d'irrigation similaires à celles d'un cours de golf ou d'un cimetière, et (ii) les enfants n'y ont pas d'accès ou d'exposition directe. Il n'y a pas de limitation lorsque une eau usée tertiaire et désinfectée est utilisée.

Le code définit les eaux secondaire désinfectée-2.2 et -23, ainsi que tertiaire désinfectée. En résumé :

- Une eau secondaire désinfectée-2.2 a été oxydée et désinfectée de sorte que la concentration moyenne de coliformes totaux ne dépasse pas 2.2 MPN/100ml sur une semaine d'analyses, et pas plus d'une fois 23 MPN/100ml par mois ;
- Une eau secondaire désinfectée-23 suit la même règle avec respectivement 23 et 240 MPN/100ml
- Une eau tertiaire désinfectée est une eau secondaire désinfectée-2.2 où aucune mesure ne montre une concentration de coliformes totaux supérieure à 240 MPN/100ml, dont le processus de désinfection vérifie des critères énumérés dans le code, et qui de plus a été filtrée (critères à suivre aussi).

En résumé :

Type d'eau régénérée	Coliformes totaux (MPN/100ml)	Turbidité (NTU)	Utilisations autorisées
Tertiaire désinfectée ^a	<2.2	2 en moyenne 5 maximum	Toutes les utilisations décrites dans la première table.
Secondaire désinfectée-2.2	<2.2	N/A	Toutes les utilisations décrites dans la première table, exceptées l'irrigation de parcs ou de terrains de jeu (et d'autres zones urbaines comme les cours d'école, les cours résidentielles, les cours de golfs associés à des résidences), de cultures en contact avec l'eau régénérée, confinements non restreints
Secondaire désinfectée -23	<23	N/A	Mêmes restrictions que précédemment, avec en plus l'interdiction d'irriguer des cultures alimentaires, ou d'arroser un jardin
Secondaire non désinfectée ^b	N/A	N/A	Irrigation goutte-à-goutte ou de surface de fourrage, de fibres, de graines de vergers, d'arbres et de betteraves (cultures alimentaires traitées commercialement)

^a filtrée à travers un sol naturel inchangé, ou d'autres média à filtration comme le sable, ou les terres d'infusoires

^b dont la matière organique est stabilisée, non putrescible, et contient de l'oxygène dissout

Une législation particulière pour la recharge de nappe avec des eaux usées traitées est en cours d'élaboration. Une ébauche est disponible sur le site du ministère de la santé californien⁴⁸.

⁴⁸ Site : <http://www.dhs.ca.gov/ps/ddwem/waterrecycling/default.htm>

6. Espagne⁴⁹

L'Espagne se pose la question de l'amélioration de la gestion de sa ressource en eau depuis 1985. Le Syndicat d'eau de Costa Brava a été pionnier en matière d'épuration et a commencé à réutiliser des eaux usées traitées à cette époque.

Les usages d'eau régénérée ont d'abord été les golfs, puis l'agriculture, et enfin les usages urbains. Le Ministère de l'Environnement travaillerait depuis 1999 sur un décret régulant la réutilisation des eaux usées. Alors qu'il était sur le point de publier celui-ci, la prise en compte d'accidents de légionellose occasionnés par des tours de refroidissement d'usines pourtant exploitées correctement (et n'utilisant pas d'eau régénérée) a incité le législateur à supprimer cet usage de son décret, au grand dam des sociétés productrices d'électricité qui s'en sont plaint. Du coup, il n'y a pas de législation et l'évaluation se fait encore au cas par cas.

Le projet de loi est le suivant (Ministerio de Medio Ambiente, 2007) :

Critères	Nématodes intestinaux ⁵⁰ (Œuf/10L)	E.coli (UFC/100 mL)	MES (mg/l)	Turbidité (NTU)	Autres
Usages urbains					
1.1 résidentiels : arrosage de jardins privés, toilettes, autres applications domestiques etc.	1	0	10	2	Legionella spp. : 100 UFC/l (s'il y a risque d'aspersion)
1.2 services urbains : arrosage d'espaces verts, nettoyage de rue, systèmes anti-incendie, lavage industriel de véhicules	1	200	20	10	
Usages agricoles					
2.1 arrosage direct de cultures comestibles à l'état cru	1	200	20	10	Legionella spp. : 100 UFC/l (s'il y a risque d'aspersion)
2.2 arrosage direct de cultures subissant un traitement industriel avant consommation, arrosage de fourrages pour bétail producteur de viande ou de lait, aquiculture	10	1.000	35	-	Taenia saginata et Taenia Solium : absence d'oeufs (en cas d'arrosage de fourrages pour bétail producteur de viande)
2.3 Arrosage de	10	10.000	35	-	Legionella spp. : 100

⁴⁹ Source : entretien avec Rafael Mujeriego

⁵⁰ Ancylostoma, Trichuris, Ascaris

Critères	Nématodes intestinaux ⁵⁰ (Euf/10L)	E.coli (UFC/100 mL)	MES (mg/l)	Turbidité (NTU)	Autres
<i>cultures ligneuses sans contact de l'eau avec les fruits consommés, de fleurs ornementales et de cultures industrielles, céréales etc.</i>					UFC/l
Usages industriels					
<i>3.1 Eaux de process et de nettoyage, sauf pour l'industrie alimentaire</i>	-	10.000	35	15	Legionella spp. : 100 UFC/l
<i>3.2 Tours de réfrigération et condensateurs évaporateurs</i>	Absence d'oeufs	Absence d'UFC/l	5	1	Legionella spp. : absence d'UFC/l
Usages récréatifs					
<i>4.1 Arrosage de golf</i>	1	200	20	10	Si l'arrosage se fait à ras le sol (p.ex. microaspersion), les critères 2.3 s'appliquent. Legionella spp. : 100 UFC/l (s'il y a risque d'aspersion)
<i>4.2 étangs, plans et cours d'eau ornementales inaccessibles au public</i>	-	10.000	35	-	Phosphore total dissolu : 2 mg P/l (pour les eaux stagnantes)
Usages environnementaux					
<i>5.1 Recharge de nappe par percolation à travers le sol</i>	-	1.000	35	-	Nitrogène total dissolu : 10 mg N/l Nitrate: 25 mg NO ₃ /l
<i>5.2 Recharge de nappe par injection directe</i>	1	0	10	2	
<i>5.3 Arrosage de forêts et autres espaces verts inaccessibles au public, sylviculture</i>	-	-	35	-	
<i>5.4 Autres usages environnementaux (maintien d'espaces humides, débits d'étiage etc.)</i>	La qualité minimale requise sera étudiée au cas par cas.				

7. France

a) La réglementation de 1991

La première législation française, concernant la réutilisation des eaux usées, établie par le CSHPF (Comité Supérieur de l'Hygiène Publique de France), a vu le jour en 1991 :

Qualité	Concentration en œufs d'helminthe	Concentration en coliformes thermotolérants	Contraintes de distance	Types d'usages autorisés
C	Pas de contrainte	Pas de contrainte	(Irrigation souterraine et localisée)	Irrigation des cultures céréalières et fourragères, des vergers, des forêts et des espaces verts non ouverts au public
B	$\leq 1/l$	Pas de contrainte	Distance > 100 mètres des habitations	Irrigation des cultures céréalières et fourragères, pépinières, végétaux consommables après cuisson et des espaces verts non ouverts au public.
A	$\leq 1/l$	$\leq 1000/100\text{mL}$	Distance > 100 mètres des habitations	Irrigation des cultures maraîchères, céréalières, fourragères, des vergers, des prairies, des forêts et des espaces verts.

D'après V. Lazarova (2007a), le CSHPF se distingue sur deux sujets des recommandations de l'OMS :

- Propagation par aérosol : les travaux de Pierre Boutin amènent le CSHPF à introduire une limite de distance de 100 mètres entre les arrosages et les habitations, ou zones de sport et de loisirs ;
- Un critère sur les métaux lourds qui devait être assorti d'opérations de suivi qui n'ont pas été réalisées.

L'obligation d'instaurer une distance de sécurité freine très largement l'essor de la réutilisation d'eaux usées pour les jardins publics car il faut alors arroser en-dehors des heures d'ouverture au public, ceci bien que les critères français correspondent à cette époque à la plus stricte des normes OMS.

b) Le projet de l'année 2000

Le CSHPF s'est à nouveau penché sur la réglementation entre 1999 et 2000 sur un projet d'arrêté⁵¹ qui est depuis 2006 en cours d'examen par l'AFSSA :

⁵¹ Source : Ministère de la Santé et des Solidarités, document de travail.

Usage et /ou type d'activité	Niveau de qualité requis	Restrictions ou modalités d'intervention
- Cultures maraîchères, légumières et fruitières non transformées, par cuisson, pasteurisation ou irradiation - Arboriculture fruitière pâturage - Espaces verts ouverts au public (golfs, terrains de sport)	A	avec aspersion aspersion en dehors des heures d'ouverture au public
- Cultures maraîchères, légumières et fruitières transformées, par cuisson, pasteurisation ou irradiation - Cultures florales, pépinières et arbustes - Cultures céréalières et fourragères	B	avec aspersion
- Cultures florales, pépinières et arbustes - Arboriculture fruitière - Cultures céréalières et fourragères	C	aspersion interdite sous frondaison et hors aspersion aspersion interdite
- Forêt d'exploitation avec accès contrôlé du public	D	aspersion interdite

Niveau de qualité	A	B	C	D°
MES mg/l	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35
Si lagunage naturel	≤ 150*	≤ 150*	≤ 150*	≤ 150*
DCO* mg/l	≤ 125	≤ 125	≤ 125	≤ 125
E. Coli /litre	≤ 10 000	≤ 10 000	≤ 100 000	-
Salmonelles /litre	absence	-	-	-
Œufs de ténia /litre	absence	-	-	-

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

° ce niveau ne permet pas l'aspersion

Nature des activités à protéger	Niveaux de qualité		
	A	B Si aspersion maîtrisant les aérosols	C et D
Habitations	50 m si aspersion	100 m	-
Voies de circulation	50 m si aspersion	50 m	-
Milieu hydraulique superficiel	20 m	50 m	100 m
Conchyliculture et aquaculture	50 m	200 m	300 m
Baignades	50 m	100 m	200 m
Périmètres de protection des points d'eau AEP	Selon dispositions de l'arrêté de DUP	Selon dispositions de l'arrêté de DUP	Selon dispositions de l'arrêté de DUP

Toujours d'après V. Lazarova, la distance de sécurité induite par l'utilisation en aérosol est modulée, mais maintenue : elle revient toujours à une interdiction de fait de l'usage des eaux usées traitées pour l'arrosage des jardins publics. Lazarova souligne que fort peu de travaux ont été réalisés sur la propagation des pathogènes par les aérosols. En 1998, Devaux aurait tenté de détecter dans périmètre d'irrigation de Clermont-Ferrand la présence entre 10 à 150 mètres d'un canon d'irrigation de coliformes thermotolérants et d'entérocoques dans les aérosols émis par ce canon. L'eau d'irrigation contenait des valeurs de pathogènes correspondant ou excédant légèrement le critère de l'eau de catégorie A ; tandis qu'aucun entérocoque n'a été détecté dans les aérosols et que seulement une fois, 2 coliformes

thermotolérants ont été mis en évidence. Lazarova juge ces résultats très encourageants, bien que trop rares encore pour établir des critères clairs quant à l'eau régénérée destinée à l'arrosage par aspersion.

Il est important de noter que ce projet de décret, datant de 2000, n'intègre pas la démarche de quantification des risques microbiologiques apparues en 2006 dans les recommandations de l'OMS, et peut ainsi être qualifié de relativement empirique.

Ce type de modèle du risque prend pourtant son essor en France : dans le domaine du risque industriel par exemple, la Loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages a introduit l'estimation de la probabilité d'occurrence, de la gravité et de la cinétique dans les études de dangers pour les installations soumises à autorisation. L'arrêté du 29 septembre 2005 est venu compléter cette loi par des seuils réglementaires.

On obtient ainsi une matrice croisant probabilité et gravité et détermine le risque acceptable pour la population (très proche dans son esprit du modèle DALY des dernières recommandations OMS).

GRAVITÉ	PROBABILITÉ	Faible E	Moyenne D	Elevée C	Forte B	Très forte A
Déastreuse						
Catastrophique		RISQUE À MAÎTRISER			RISQUE TROP ÉLEVÉ	
Importante						
Sérieuse		RISQUE MOINDRE				
Moderée						

Source : La prévention des risques technologiques ; DRIRE Centre, 2006

Valentina Lazarova insiste enfin sur la nécessité de définir de bons indicateurs, i.e. des éléments dont les concentrations sont supérieures aux limites de détection dans les eaux usées brutes et traitées. Elle précise que les conditions d'expérimentation dans les laboratoires où il est facile d'ensemencer les eaux testées sont différentes de celles du terrain où les organismes contenus dans l'eau régénérée sont en quantité parfois trop faible pour être détectés, et qu'en général, en France, il n'y a pratiquement pas d'œufs d'helminthe.

c) Quel avenir pour la réutilisation en France ?

La réutilisation des eaux usées a déjà lieu dans une très large mesure en France, mais de manière indirecte. Les eaux usées traitées, et rejetées dans les fleuves et rivières français, sont en effet pompées en peu plus loin en aval par les agriculteurs dont la seule contrainte réside à payer une redevance à l'Agence de l'Eau locale. On estime qu'en période d'étiage pas moins de la moitié du débit de la Seine à Paris est constitué d'effluents traités (D. Fourmeau, 2002).

Le rejet en milieu naturel, notamment régulé par le décret du 3 juin 1994 qui fixe des limites pour la DBO₅, la DCO et la MES (et, dans le cas de milieux sensibles, en azote et phosphore),

s'avère aujourd'hui beaucoup moins contraignant que le dernier projet d'arrêté pour la réutilisation des effluents usés : il n'exige pas en particulier de distance de sécurité limite lors de l'arrosage avec ces derniers.

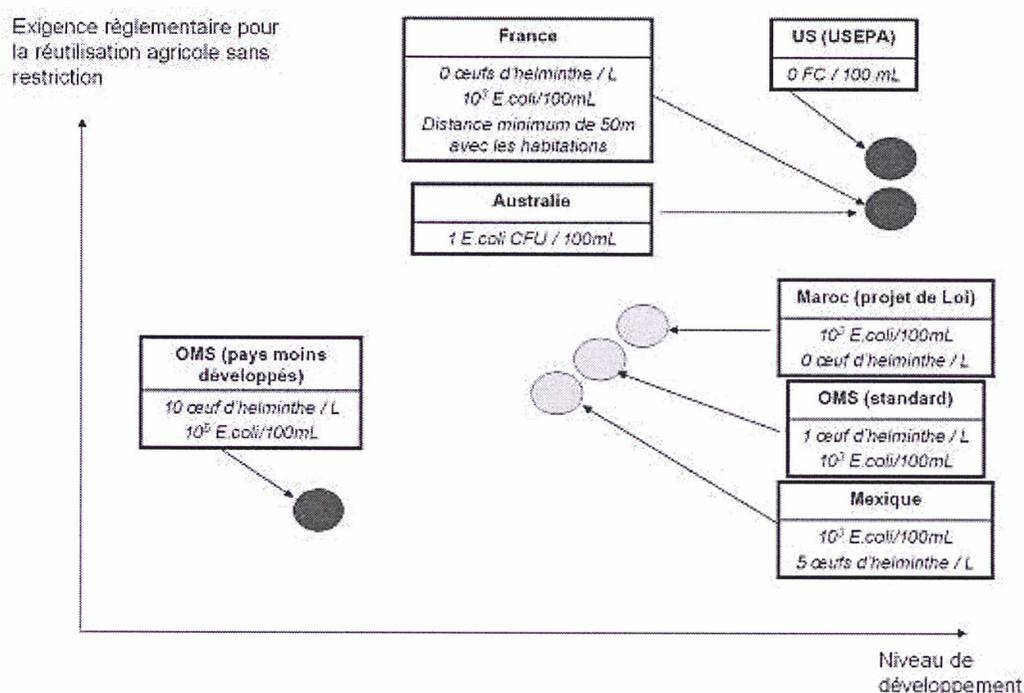
Des pilotes ponctuels, comme celui de Grau-du-Roi actuellement, permettront peut-être à la législation française d'évoluer vers des normes plus pragmatiques.

8. Comparaison des normes des pays développés et en développement⁵²

Le chemin parcouru par les pays développés et ceux en développement en matière de traitement des eaux usées est très différent. Les premiers ont déjà développé des traitements primaire, secondaire et tertiaire pour se mettre en conformité avec la législation protégeant l'environnement, diminuant fortement les concentrations des organismes générant une DBO, de l'azote et du phosphore, et partent donc d'un niveau d'exigence fort lorsqu'ils envisagent la réutilisation des eaux usées.

Les pays en voie de développement ont au contraire l'opportunité de sauter l'étape du traitement à des fins écologiques pour passer directement à la réutilisation. C'est par exemple le cas de Mexico qui envisage de traiter les eaux usées brutes qui arrosent actuellement la vallée de la Tula, et a adopté un traitement peu cher qui est très efficace pour réduire les pathogènes – en concentration plus élevée que dans des pays plus développés – mais n'a pas à se soucier des métaux très peu présents dans les eaux usées de la ville, contrairement aux USA par exemple.

Le diagramme ci-dessous, basé sur la législation comparée de plusieurs pays et de l'OMS, met en relief leurs différents niveaux d'exigence⁵³.

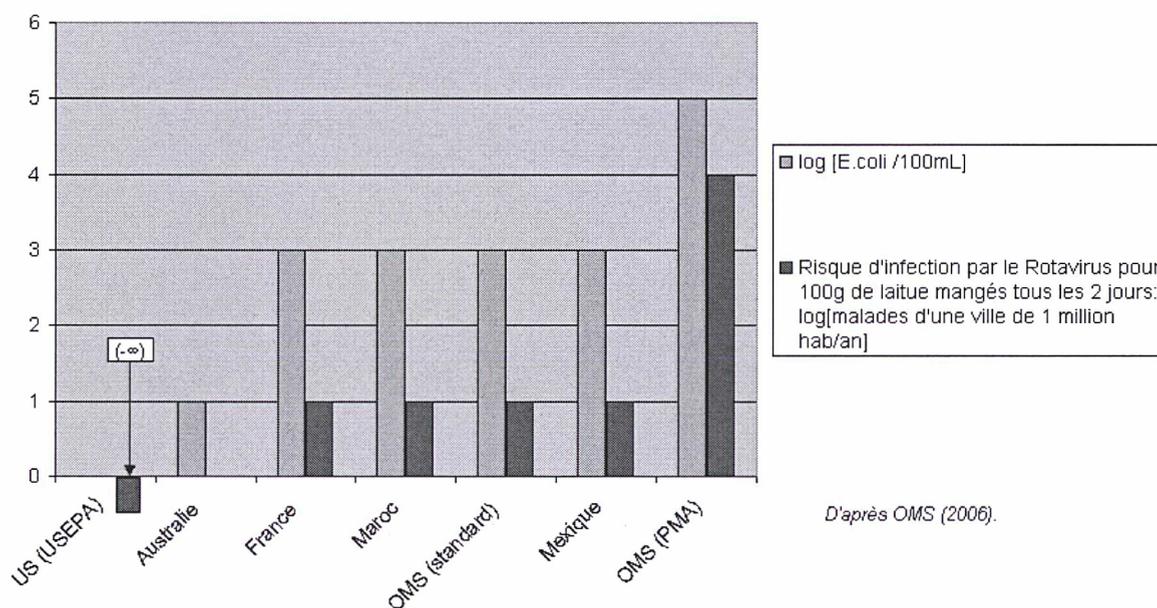


Les normes US (USEPA) et australienne peuvent être considérées comme déjà trop sévères, puisque les concentrations maximales exigées en coliformes sont à la limite du seuil de détection (pour le E.coli et en fonction de la méthode utilisée, celui-ci est de 1 à 9 E.coli/100mL).

On peut déduire des concentrations de pathogènes autorisées le risque inhérent à leur présence sur des cultures consommées crues pour la population⁵⁴ :

⁵² Source pour ce chapitre: (Jimenez et al., 2001b)

⁵³ Echelles d'abscisse et d'ordonnée arbitraires.



Le niveau d'exigence réglementaire reflète le prix que chaque pays accorde à la santé, la vie même, de ses habitants (Fattal et al.). Pour une ville d'une taille d'environ un million d'habitants, il est estimé que la mise en place d'un traitement conforme à la réglementation OMS pour l'agriculture sans restriction (1000 FC/100mL) coûterait approximativement US\$ 12.5 M. Alors que le risque de contracter une maladie contagieuse (incluant la typhoïde, l'infection par le Rotavirus, le choléra et l'hépatite A) en mangeant des végétaux crus irrigués par des eaux usées non traitées est compris entre 5 et 15%, le respect des normes OMS limite le risque à 0.006%. Les 99.940 maladies annuelles au moins évitées pour la ville d'un million d'habitants auront donc coûté US\$ 125.

Les normes USEPA sont plus strictes (« 0 FC/100mL » soit en-dessous de la limite de détection) et donc plus chères à développer (pour la même ville, environ US\$ 40M). Le différentiel de coût avec le traitement OMS se justifie donc par une valeur de la maladie d'au moins US\$ 450.000⁵⁵. Les normes d'un même pays ne sont pas nécessairement cohérentes entre elles, puisque les normes USEPA pour l'eau potable tablent sur un risque annuel de tomber malade de 0.01%, cent fois plus élevé que l'objectif OMS pour la réutilisation des eaux usées.

Comme le conclut Jimenez dans (Jimenez et al., 2001b), il existe deux scénarii possibles d'évolution à partir de la situation actuelle. Dans le premier, la législation des pays développés continue de se rigidifier, exigeant à la limite que les seules molécules H₂O puissent filtrer à travers les usines de traitement, auxquelles seront ajoutées des vitamines et des engrais. Les pays en voie de développement poursuivront leurs pratiques actuelles d'un traitement plus simple et leurs produits agricoles pourraient se voir refuser une certification que les agences sanitaires ou les consommateurs des pays riches demanderaient, engendrant ainsi une récession économique dans les pays plus pauvres qui ne pourraient plus vendre leur production au Nord.

Dans la seconde option, tous les pays se mettraient d'accord sur des conditions de réutilisation et de traitement en fonction d'un niveau de développement socio-économique. Cette option

⁵⁴ La valeur (-∞) de la norme US correspond à un risque nul.

⁵⁵ (40.000.000-12.500.000)/61= 450.800

nécessite un dialogue accru entre la population d'une part, la communauté scientifique et les législateurs. Il existe aussi un risque que des intérêts commerciaux poussent les pays plus pauvres à adopter des législations trop restrictives, qui doit être évité par une solution « gagnante-gagnante » pertinente à la fois commercialement et socialement.

Plusieurs auteurs militent aussi pour une législation graduelle à vocation internationale (Anderson et al., 2001), qui apporterait le triple avantage de permettre aux autorités d'accorder plus de temps à la gestion du risque qu'à la définition des normes sanitaires, de permettre aux efforts de recherche d'être mieux ciblés au niveau international, et de favoriser la compréhension et la confiance du public en ces normes.

Une telle législation comprendrait ainsi par exemple 5 qualités d'eau, qui se verraient autoriser ou interdire certains usages. Quelques-uns d'entre eux sont mentionnés ci-dessous.

Usage \ Qualité	Médiocre <10 ⁴ UFC/100mL	Moyenne <10 ³ UFC/100mL	Bonne <10 ² UFC/100mL	Très bonne <10 ¹ UFC/100mL	Excellente <10 ⁰ UFC/100mL
	★	★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★
Recharge directe de nappe	Interdite	Interdite	Interdite	Autorisée après mélange	Autorisée
Recharge indirecte de nappe par percolation (> 3m)	Interdite	Autorisée après mélange	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Irrigation de cultures mangées crues	Interdite	Interdite	Interdite	Autorisée	Autorisée
Arrosage de pelouse	Autorisée si quarantaine >4h	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée

Inspiré librement de : A Fresh Look at Microbial Guidelines for Wastewater Irrigation in Agriculture: A Risk-assessment and Cost-effectiveness Approach

9. Droit d'exploitation et de propriété des eaux usées

Il convient, en préambule de cette partie décrivant comment les droits d'exploitation des eaux usées sont gérés dans les deux pays visités par les auteurs, de définir ce qu'on appelle systèmes satellites et systèmes décentralisés.

Les stations « satellites » sont (D. Safrit, 2004) localisées dans des endroits stratégiques pour réaliser un traitement et une décharge ou une réutilisation spécifiques, représentant généralement une petite fraction d'un système de gestion des eaux usées plus général. Les systèmes satellites sont flexibles, si bien qu'en hiver par exemple, le volume d'eaux usées traitées à des fins d'irrigation peut tomber à zéro, les effluents étant traités plus en aval de la station. Ce modèle d'organisation est particulièrement attractif en théorie pour la réutilisation des effluents, car il évite d'avoir à envoyer les effluents bruts vers une station centrale, puis de les ramener sur site une fois traités. Les effets d'échelle jouent par contre en défaveur de ce système, mais l'automatisation et le contrôle à distance de technologies s'y prêtant - comme les bio-réacteurs à membrane - permettent d'éviter un coût du personnel sinon plus important.

Les systèmes décentralisés sont des composantes d'un système global qui répartit les volumes à traiter entre plusieurs stations d'épuration, et apportent une redondance en cas de défaillance de l'une d'entre elles. Il est notamment rapporté (Pinkham et al., 2004) que les systèmes décentralisés permettent une **meilleure adéquation de la capacité avec le besoin** de traitement qu'une station unique requérant un investissement important et impliquant un choix technologique fort ; mais ne permettent pas la **péréquation des coûts** impliqués par différentes situations locales tandis qu'un système centralisé le peut. Des soucis de fiabilité peuvent enfin amener à préférer un système central, bien qu'ils risquent d'influencer l'hydrogéologie locale.

a) Australie⁵⁶

En 2006, l'IPART (« Independent Pricing And Regulatory Tribunal » du New South Wales) a reconnu que la réutilisation des eaux usées émergeait comme un des leviers principaux pour retrouver l'équilibre entre offre et demande d'eau pour l'Etat, et qu'une croissance importante du secteur était prévue dans les 10 années à venir. La réforme qu'il entreprend prévoit que des acteurs privés autorisés puissent émerger pour fournir de l'eau potable et régénérée. Le régime proposé inclut notamment un droit **opposable** aux entités qui souhaiteraient fournir un service d'eau de négociateur « de bonne foi » avec le propriétaire de l'infrastructure. Les tarifs de ces nouveaux acteurs pour des services facultatifs ne seront pas régulés par IPART pourvu qu'ils soient en compétition avec d'autres fournisseurs (pour éviter les tarifs de monopole), et tous les consommateurs garderont la possibilité de se fournir en eau potable et en assainissement auprès de l'opérateur historique à des prix fixés par le Tribunal.

Le principe de la collection d'effluent par un acteur privé⁵⁷ est que **Sydney Water n'en fera pas payer son extraction** depuis son réseau d'assainissement. Il est mentionné que SW devra recouvrir les coûts inhérents à cette connexion au réseau et aux opérations courantes, mais devra tenir compte des économies qui y sont liées et les soustraire des coûts facturés à l'opérateur privé.

⁵⁶ Source pour ce chapitre : (IPART, 2006)

⁵⁷ Pour l'instant principalement limité pour la ville de Sydney à l'expérience du Parc Olympique

Car le législateur reconnaît qu'il peut y avoir des situations où les bénéficiaires de projets de réutilisation ne seraient pas nécessairement leurs utilisateurs ; celles-ci incluant entre autres les cas où :

- il existe des règles de réduction de consommation d'eau pour les nouveaux développements immobiliers (comme le BASIX, fixant un minimum de 40% de réduction), ou pour les opérateurs du service public (comme Sydney Water) ;
- la réglementation environnementale concernant le rejet dans le milieu naturel rend l'option de la réutilisation la moins chère de toutes (en évitant par exemple de mettre à jour une station existante),
- le gouvernement mandate un projet de réutilisation pour répondre à des politiques publiques plus générales.

La mauvaise répartition des bénéfices de ces projets peut bloquer l'émergence d'un projet socialement optimal, aussi IPART recommande que dans les cas évoqués, les prix soient fixés en fonction de la disposition à payer des clients potentiels d'eau régénérée, et des coûts que les autres clients du réseau **auraient eu à payer si le projet n'avait pas été réalisé.**

Cette expérience d'autorisation d'accès au réseau public par d'autres parties est assez unique d'après (Marsden Jacob Associates, 2005), même au niveau mondial:

- depuis 1988, l'OFWAT (Office of Water Services), en Angleterre et au Pays de Galles, requiert des opérateurs du service d'eau qu'ils établissent des conditions d'accès et les rendent publiques ;
- en Californie, la Loi Katz Wheeling de 1986 a tenté de reconnaître le droit d'utiliser les infrastructures de transport d'autres bassins pour pouvoir réaliser des échanges ;
- en Australie, l'utilisation des pipelines de SA Water par Barossa Infrastructure Limited et celle de la station de traitement et des pipelines de Brisbane Waters par d'autres municipalités sont des exemples importants d'accès à d'autres parties grâce à une négociation volontaire et un contrat.

Quelles seront les conséquences de la loi australienne ? Il est encore trop tôt pour juger, cependant certains évoquent le risque d'acteurs privés s'emparant de l'assainissement de certains quartiers (proches de la mer par exemple) où celui-ci serait le moins cher de la ville, à un prix inférieur au tarif de l'opérateur historique mais leur permettant néanmoins de faire un profit. Ce dernier, moyennant ses coûts sur l'ensemble de ses clients, pourrait se voir obligé d'augmenter ses tarifs sur la population desservie restante, gommant ainsi l'effet redistributif dont il était auparavant l'auteur.

b) Mexique

Le directeur de l'assainissement de San Lui Potosi a mentionné au binôme l'existence de tels modèles où un exploitant privé se fournit en effluents dans le réseau public pour alimenter un schéma privé d'alimentation en eaux usées régénérées.

Dans le premier, une compagnie privée a contracté une concession de 100 ans avec Interapas, l'autorité locale d'alimentation en eau potable et d'assainissement, pour acheter des eaux usées au prix de 35ct peso /m³. Après les avoir traitées, elle les redistribue à des industriels proches de sa station, dans le Sud de la ville, au prix de 11 pesos /m³. Le volume actuellement traité est de 35l/sec.

Le second exemple cité concerne le traitement d'eaux usées pour un golf, et le club annexé. Une station de pompage amène les effluents à une station de traitement (boues activées et chloration). Celle-ci, calibrée pour un volume de 80L/sec, n'utilise actuellement qu'une capacité de 40L/sec du fait de la faible surface à irriguer aujourd'hui. Un pipeline de 5 kilomètres envoie ensuite les eaux usées traitées vers un golf, et un double réseau qui alimente le club adjacent. Un système de drainage permettrait de récupérer environ 40% des eaux d'irrigation.

IV) Economie

Dans cette partie, les coûts de projets seront alternativement donnés en dollars américains (USD), australiens (AUD) ou en pesos mexicains. A titre de comparaison, on pourra adopter comme base de comparaison les valeurs suivantes⁵⁸ :

1€ = 1.38 USD 1€ = 14.85 MXN 1€ = 1.58 AUD
--

1. Externalités, bénéfiques et coûts indirects

Au-delà du cas spécifique de villes côtières qui sinon déverseraient leurs effluents dans la mer, et sauf dans les pays très secs, il est important de noter d'emblée que la réutilisation des eaux usées n'amène pas en général d'accroissement quantitatif global du niveau de la ressource eau. En effet, les eaux usées sont traditionnellement rejetées dans un cours d'eau, pour être utilisées indirectement un peu plus en aval⁵⁹. Il est donc nécessaire de détailler plus précisément quels peuvent être les bénéfices indirects pour les utilisateurs d'eau régénérée, et même les non utilisateurs qui les côtoient (on parle alors d' « externalités »).

a) Un peu de théorie

Comme le rappelle Yves Martin (Y. Martin, 1988), le principe fondamental est d'internaliser les coûts externes des consommateurs d'eau et producteurs de pollution liée à cette eau, en modulant idéalement ces valeurs en fonction du temps et de l'espace.

La théorie économique peut ainsi évaluer l'« optimum de pollution » pour une société (PN Giraud, 2007). Si l'on désigne par Q la quantité de pollution permettant à un industriel de réaliser son activité (par exemple), par $D(Q)$ les dommages monétaires subis par les riverains et par $C(Q)$ le coût de l'industriel à réduire sa pollution à un certain niveau (dont on peut supposer qu'il tend vers l'infini lorsque Q se rapproche de zéro, et qu'on pose comme valant arbitrairement zéro au niveau actuel de pollution rejetée), l'optimum Q^* vérifie :

$$D'(Q^*) = -C'(Q^*)$$

Dans le cas de plusieurs industries, chaque Q_i doit vérifier :

$$D'(\sum Q_i) = -C'_i(Q_i)$$

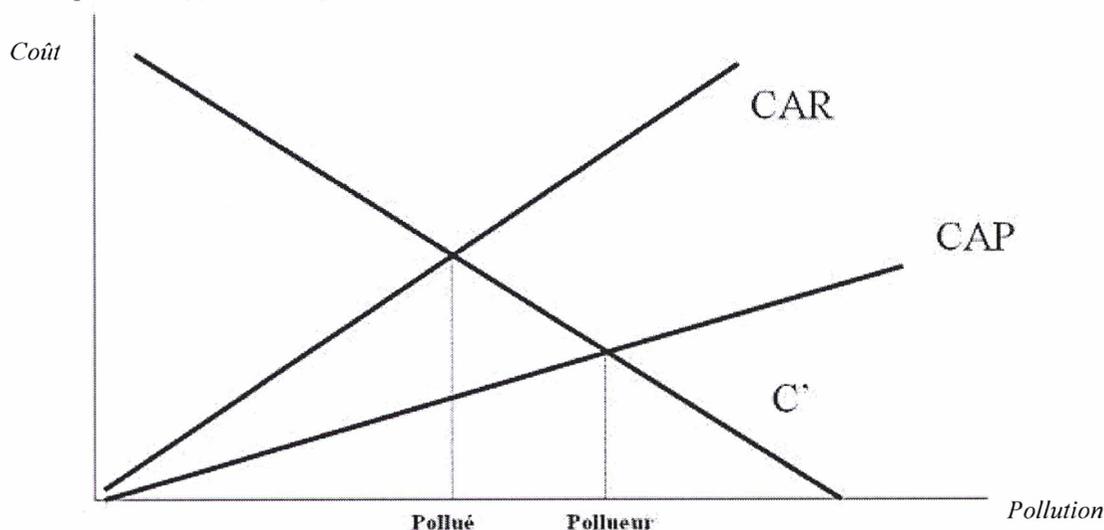
⁵⁸ D'après le site du Mataf (<http://www.mataf.net/conversion-monnaie.htm>), au 18/07/2007.

⁵⁹ Se référer à la partie I, chapitre « Réutilisation potable »

Il existe trois moyens d'obtenir cet équilibre optimal :

- La **taxe pigouvienne** (du nom de l'économiste Arthur Pigou) qui taxe l'industriel pour chaque unité de pollution rejetée dans l'environnement. Si la taxe est fixée telle que : $T = D'(Q^*)$, l'industriel ajustera son niveau de pollution au niveau optimal. Le principe de cette taxe marche tout aussi bien avec plusieurs acteurs qui polluent, mais exige que le législateur connaisse la fonction de coût de (ou des) industriel(s).
- La **norme** définit un minimum de dépollution. On vérifie que l'optimum est toujours atteint si : $N = Q^*$; cependant il est nécessaire de définir la norme pour chaque acteur quand il y en a plusieurs, engendrant ainsi la même contrainte de connaissance des fonctions de coût des industriels pour le législateur.
- Les **droits à polluer** représentent la troisième et dernière manière de procéder et sont aussi la plus habile puisqu'elle permet au législateur de décentraliser les choix effectués par chaque acteur. Si l'on met un nombre de droits à polluer égal au niveau optimum toléré par la population environnante, ceux-ci s'échangent entre les industriels au prix de la taxe pigouvienne. Le **second théorème de Coase** énonce aussi qu'en information parfaite et en absence de coûts de transaction, il suffit que l'Etat crée des droits à polluer et les distribue au pollueur ou au pollué pour que la négociation aboutisse à l'optimum.

Une thèse récente (M. Angel, 1998) a remis en cause ce théorème, sur lequel se basent implicitement les évaluations contingentes. Si les ménages interrogés sur leur capacité à payer pour dépolluer – répondant même honnêtement – sont sous contrainte financière, la capacité à payer du pollueur sera nécessairement inférieure à leur « capacité à recevoir » du pollué en échange de la pollution réalisée. Dans ce cas, comme l'indique le graphique ci-dessous extrait de (PN Giraud, 2007) où la pollution figure en abscisse et une unité monétaire en ordonnée, le niveau de pollution à l'équilibre sous-optimal (intersection C' et CAP) sera supérieur au niveau optimum (C' et CAR).



Certains schémas de réutilisation présentent aussi des gains pour **certain types d'acteurs**. Il convient donc aussi de **quantifier ces externalités**, et de discuter du partage de leur valeur au sein de la communauté d'intérêts de la ressource en eau locale.

Les auteurs de la présente étude tentent donc de lister ci-dessous les externalités liées à la réutilisation des eaux usées, mais aussi les effets indirects liés à celle-ci, afin d’embrasser une vue globale des effets positifs et négatifs de la réutilisation des effluents : le lecteur doit bien entendu garder du recul par rapport à cette énumération qui ne saurait être exhaustive.

b) Non eutrophisation / non pollution de l’environnement

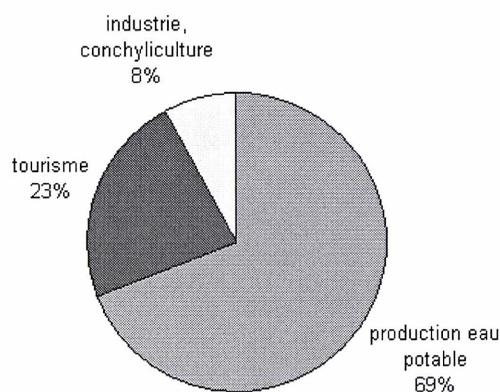
La première des externalités des eaux usées régénérées est de ne pas avoir à déverser des effluents dans le milieu naturel, protégeant ainsi celui-ci d’une pollution ou d’une eutrophisation, et évitant le coût d’un traitement spécifique.

Dans les pays où la législation protégeant l’environnement est déjà très développée et respectée, la réutilisation permet d’éviter les coûts de traitement avant rejet dans l’environnement. Le principal coût évité est alors celui de l’opération de déphosphatation (SDAGE RMC, 1996). En effet, Carbone, Oxygène et Hydrogène sont abondants dans le milieu aquatique à travers les molécules CO₂ et H₂O. Le développement de végétaux est donc fonction principalement des quantités d’azote et de phosphore dans l’eau, et de leurs proportions respectives. Or, la quantité d’azote est proportionnellement plus importante dans le milieu naturel que celle de phosphore par rapport au besoin des végétaux : alors que les algues ont besoin de 7 fois plus d’azote que de phosphore, le premier élément est en général 20 à 40 fois plus présent que le second dans l’eau des rivières. Les eaux usées urbaines, seulement 2 à 4 fois plus riches en azote qu’en phosphore (donc proportionnellement riches en phosphore), participent donc à la prolifération végétale.

Il existe deux types de traitement de déphosphatation : les procédés physico-chimiques ajoutent un réactif (sels métalliques, chaux) à l’eau usée pour créer un précipité insoluble ; les procédés biologiques soumettent la masse bactérienne à une phase anaérobie puis aérobie pour permettre une surconsommation du phosphore. Leurs performances et coûts indicatifs sont décrits dans le tableau suivant :

	Procédés physico-chimiques	Procédés biologiques
<i>Performance</i>	Rendements élevés (> 80%) avec des concentrations de 1 à 2 mg/l de P total.	Rendement de 50 à 65%.
<i>Coût</i>	Investissement : de 1.2 à 2.4€ /EH pour une station neuve, soit un surcoût de 1 à 3%. Coût plus élevé pour une station existante. Fonctionnement : de 1.2 à 2.4€ /EH/an (y.c. traitement des boues), soit une majoration de 10 à 20% par rapport à une station classique.	Investissement : de 2.3 à 6.1€ /EH, soit un surcoût de 2 à 6%. Fonctionnement : pas de surcoût pour un procédé biologique strict, surcoût variable pour un procédé mixte.

En cas de non déphosphatation, les dommages sont multiples. Les Agences de l'Eau en ont par exemple recensé de quatre types, dont trois ont été monétarisés⁶⁰. Ainsi, il est estimé qu'en plus de la perte écologique non chiffrée dans l'étude, l'eutrophisation en France en 1988 avait coûté 1000 à 1270MF pour la production d'eau potable, 300 à 470MF au tourisme (surtout en zone littorale), et 100 à 160MF aux industries, dont la conchyliculture. L'évaluation de la protection écologique et des éléments supplémentaires sur le tourisme sont traités ultérieurement dans ce présent chapitre.



c) Agriculture et nutriments des eaux usées

Ce chapitre est principalement basé sur l'expérience de Mexico (B.Jimenez, 2005). Depuis 1789, les eaux usées de Mexico sont envoyées au Nord de la ville, en direction de la vallée Tula. Aujourd'hui, ces eaux usées servent à plus de 70.000 agriculteurs pour irriguer une surface comprise entre 76.000 et 90.000 hectares, dans une zone recevant des précipitations annuelles de 550mm et une évaporation de 1700mm.

Les bénéfices des nutriments contenus dans les eaux usées servant à irriguer les cultures de Mexico sont évidents. Le tableau suivant présente le revenu agricole, par unité de surface et par rapport à un terrain simplement arrosé par la pluie :

Revenu/ha	Maïs	Haricots	Orge	Blé	Prix de marché du terrain/ha
Pluie	1	1	1	1	US\$ 183/an
Irrigué avec de l'eau de surface	1,37	4,77	1,35	1,33	
Irrigué avec des eaux usées	1,92	7,78	1,55	1,41	US\$ 455/an

si bien que le Président du Mexique a accordé en 1990 le droit d'utiliser des eaux, à leur requête. En 1994, les agriculteurs s'opposèrent même au projet de traiter les eaux usées de la ville de Mexico. Leur revendication était double : ils devaient bénéficier du même volume d'eau si celle-ci devait être traitée, et l'eau traitée devait continuer à contenir la « substance » qui fertilisait si efficacement leur sol⁶¹.

On peut monétiser le gain d'un agriculteur à utiliser des eaux usées, plutôt que d'acheter des engrais ou de se contenter d'eaux de surfaces dépourvues de nutriments.

En effet, le prix du terrain irrigué avec les eaux usées, valorisé sur le marché, peut se décomposer en :

⁶⁰ Source : Etude inter-Agences, 1988, citée dans SDAGE RMC, 1996

⁶¹ Concentrations données dans la partie III, dans le chapitre sur le Mexique.

- Le prix d'un terrain standard sur le marché: US\$ 183/an ;
- Le prix de l'eau économisée qui peut s'évaluer grossièrement. Avec un taux d'irrigation d'environ 2 mètres (B. Jimenez, présentation), des précipitations de 55cm/an, un prix de l'énergie moyen de 1,07 peso/kW.h⁽⁶²⁾, et une hypothèse de profondeur de l'eau de 20 mètres, on trouve une économie de 845 pesos soit US\$ 76.
- La valorisation intuitive par les fermiers de l'externalité⁶³ : **US\$ 196/ha/an.**

Cette valeur est comparable au calcul fait par (PNTTA, 2000) qui estime le gain en fertilisants, en fonction du type de culture, entre US\$ 161 et 390/ha ; ou encore à l'évaluation faite par les agriculteurs Pakistanais (Ensink et al) pour qui le loyer annuel est multiplié par un facteur de 2 à 6 lorsque le terrain a accès à des eaux usées : dans la ville de Quetta, le prix monte de US\$170/ha à US\$ 940/ha.

d) Sols agricoles et eaux usées

Il est généralement acquis que le principal inconvénient de la réutilisation des eaux usées sur le long terme est la salinisation des sols et des nappes (B. Jimenez, 2006a). Actuellement, entre 5 et 10 millions d'hectares de terres arables seraient perdues chaque année par dégradation du sol (J.D. Rhoades, 1997), soit 03 à 0,7% des terres actuellement cultivées. La salinité est identifiée comme la principale cause de dégradation chimique, et la saturation en eau pour la dégradation physique. D'après la FAO, l'expansion future de la production alimentaire reposera de plus en plus sur une irrigation raisonnée et la gestion des sols et de l'eau, et le maintien des ressources agricoles et de l'environnement actuel ; ce sont d'après elle les plus grands défis auxquels l'humanité aura à faire face (FAO, 1988).

D'un autre côté, la plupart des composés organiques d'origine humaine, animale ou végétale contenus dans les eaux usées sont rapidement transformés dans les sols en composés organiques stables et non toxiques (acides humiques et fulviques)(B. Jimenez, 2006a). En fait, les sols peuvent biodégrader une plus grande variété et quantité des composés organiques que les masses d'eau ne le peuvent : sous certaines conditions d'irrigation limitée et d'inondation intermittente, ce sont des centaines de kilogrammes de DBO qui sont dégradés chaque jour par hectare sans impact sur l'environnement (H. Bouwer, 1991).

La législation ne tient pas compte de ce phénomène : dans le cas de la France, la norme de rejet des eaux usées dans le milieu naturel (Ministère de l'Environnement, 1994) impose des concentrations maximum de 25mg/l de DBO₅ et 125mg/l de DCO. La concentration de DCO avant réutilisation conserve cette dernière limite⁶⁴.

e) Réutilisation industrielle

La réutilisation des eaux usées urbaines est intéressante dans les circuits de refroidissement fermés ou ouverts. Bien que la qualité requise soit spécifique à chaque industrie en fonction des processus industriels, les préoccupations concernent principalement les phénomènes d'entartrage, d'encrassement, de formation de mousse, de corrosion, de développement de

⁶² Source : CFE (<http://aplicaciones.cfe.gob.mx/aplicaciones/QCFE/EstVenta/PorTarifa.aspx?Estado=Aguascalientes&Idioma=I&AnioMax=2006&imp=1>)

⁶³ =455-183-76

⁶⁴ Source : Ministère de la Santé et des Solidarités, document de travail.

bactéries et d'inhalation d'aérosols par le personnel du site (S. Baumont, ORS). Ces problèmes sont contrôlés par la quantité de matière en suspension (MES) et de matière organique (DBO₅), l'alcalinité, ainsi que les taux en ammoniac, calcium, magnésium, phosphore, silice et sulfate. On peut par exemple injecter de la chaux pour faire précipiter le calcium, les phosphates, le magnésium ou la silice, ou effectuer une osmose inverse pour déminéraliser l'eau ; puis enfin désinfecter l'eau par chloration. Le traitement délicat de la saumure (Knott et al., 2007), qui sinon peut être par exemple rejetée dans la mer en tuant la biodiversité, ne doit pas être occulté.

Un des arbitrages qu'ont à effectuer les industriels est la comparaison du nombre de cycles qu'autorise la qualité de l'eau utilisée avec son coût : la déminéralisation par osmose inverse ou résine échangeuse d'ions accroît en effet la valeur industrielle de l'eau du fait qu'elle est utilisée un nombre plus important de fois dans le cycle de refroidissement. A l'inverse, une eau dure mais proportionnellement moins chère peut être préférée. D'une manière générale le volume de l'eau d'appoint nécessaire, à paramètres constants, varie comme

$$\frac{R_C}{R_C - 1} \text{ où } R_c = \frac{S_A}{S_R}$$

S_A étant la salinité de l'eau d'appoint et S_R celle de l'eau du circuit.

La régularité du flux des eaux usées traitées dans le temps, avec possiblement un pic estival dû à une affluence touristique, présente aussi un intérêt pour les industriels qui souhaitent d'une part assurer un flux régulier de leur approvisionnement en matières premières, et d'autre part de se protéger de tout risque de restriction de prélèvement à cause d'une sécheresse imprévue.

f) Bénéfices sanitaires

Traiter les eaux usées réutilisées permet de diminuer le risque sanitaire qui pèse sur la population qui dépend de cette ressource. En sus des désagréments de contracter une maladie générée par l'utilisation d'eaux usées, il est important de mettre en regard le coût de traitement d'une maladie et le traitement des eaux qui permettrait sa prévention. Comme discuté précédemment⁶⁵, la réglementation OMS permet de réduire le nombre de malades dans des proportions déjà très significatives. L'intérêt de technologies plus poussées doit être comparé au coût des maladies marginalement évitées.

Il est rapporté (Siebe et al., 1995) que la proportion d'enfants affectés d'helminthiasis dans la région de la Tula précédemment décrite est seize fois supérieure à d'autres régions aux conditions socio-économiques similaires.

g) Tourisme

La qualité des eaux, et notamment de baignade, peut avoir une influence importante sur l'activité touristique de la région environnante. Une estimation (A. Courtecuisse, 1998) effectuée en 1998 montre qu'une interdiction de baignade peut entraîner des chutes du chiffre d'affaire de l'ordre de 30 à 50%. Le tourisme local où a été réalisée l'étude – les régions Nord Pas-de-Calais et Picardie – représente 3,4 milliards d'euros annuels soit 3% du PIB régional.

h) Usages « décoratifs » et récréatifs de l'eau régénérée

⁶⁵Se reporter au chapitre « Comparaison des normes des pays développés et en développement », partie III

Le quartier de Mawson Lakes, en Australie, est situé à 12km au Nord du centre des affaires d'Adélaïde. Il est prévu (J. Radcliffe, 2004) que la population atteindra 10.000 résidents, 10.000 employés et 5.000 étudiants d'ici 2010. Les eaux pluviales sont stockées dans un aquifères, puis pompées pour, entre autres usages, remplir les lacs qui embellissent le quartier. Les résidences les plus proches de ces aménagements ont vu leur prix augmenter de façon très sensible⁶⁶. Une enquête téléphonique (J. Radcliffe, 2004) menée en 2002 auprès de 136 résidents à Mawson Lakes a montré que la première raison pour leur installation était la présence de marécages et de lacs. Le double réseau d'eau non potable se classait seulement onzième, sur douze critères au total.

i) Externalités non marchandes

Ce dernier recensement d'impacts met en évidence la difficulté de donner une valeur aux retombées, positives ou négatives, de nombreux aspects de la vie liés à la qualité de l'eau : certains ne sont pas marchands, au sens où il n'existe pas (encore) de marché pour afficher sa disposition à payer (les limites de cette méthode d'approche classique ayant été signalées plus tôt dans cette partie). C'est le cas de la protection écologique par exemple.

Dans le cas où il est difficile de valoriser les externalités, une analyse multi-critères - du type de la « triple bottom line approach » australienne⁶⁷ - pourra être menée.

Protection écologique⁶⁸

Une enquête a été menée en février 2006 auprès de 420 personnes représentatives des riverains des marais de l'Erdre, pour évaluer leur capacité à payer pour la biodiversité d'un site Natura 2000.

41% des personnes sondées n'ont jamais eu l'occasion de fréquenter les marais, tandis que la majorité des habitants (60%) fréquente les bords de l'Erdre. Pour un grand nombre (44%), l'intérêt des marais se résume à sa dimension paysagère, et l'attrait pour la faune (évoquée par 22%) ou la flore (10%) est moindre. Cependant, 90% des riverains sont sensibles à la protection de la nature, et 95% estiment que ces marais ont un intérêt écologique. Enfin, les deux actions qui recueillent le plus d'attention des habitants sont la qualité de l'eau de l'Erdre (81%) et la lutte contre les espèces envahissantes (64%).

Les personnes ont été interrogées sur leur capacité à payer pour des niveaux d'objectifs supérieurs au programme de base Natura 2000 local :

	Longueur des canaux entretenus et nettoyés	Surface des prairies entretenues	Longueur des berges stabilisées	Espèces protégées	CAP moyenne (€/an)
<i>Niveau 0</i>	10%	5%	5%	1	(Pas de contribution demandée)
<i>Niveau 1</i>	30%	20%	20%	3	18,6
<i>Niveau 2</i>	50%	35%	35%	5	37,2
<i>Niveau 3</i>	70%	50%	50%	7	55,7

⁶⁶ Sources : <http://www.domain.com.au/Public/SearchResults.aspx?mode=buy&state=SA&areas=North+%26+North+East+Suburbs&sub=Mawson+Lakes&page=1> et [http://www.mawsonlakes.com.au/llweb/mawsonlakes/main.nsf/images/pdf_fs_land.pdf/\\$file/pdf_fs_land.pdf](http://www.mawsonlakes.com.au/llweb/mawsonlakes/main.nsf/images/pdf_fs_land.pdf/$file/pdf_fs_land.pdf)

⁶⁷ Décrite dans le chapitre V.2, l'approche « Triple Bottom Line » regroupe trois familles de critères à prendre en compte : économique, sociale et environnementale.

⁶⁸ Source pour ce paragraphe : (Maresca et al., 2006)

Ces montants comprennent les 26% de réponses qui refusaient toute contribution financière.

Usages récréatifs et qualité de l'environnement

Les évaluations contingentes ci-dessous sont basées sur les expériences suivantes.

- (A) La première expérience menée en 2005 concerne un tronçon de 70km du Loir (Deronzier et al., 2006), courant le risque de non atteinte du bon état des eaux (défini par la Directive Cadre européenne sur l'Eau) du fait des pollutions agricoles – nitrates et pesticides. Un premier sondage a été effectué sur site auprès de personnes majeures pratiquant une activité (pêche, promenade, canoë-kayak). Un second sondage téléphonique, auprès de personnes habitant les communes limitrophes (pour éviter le biais de surreprésentation des personnes les plus intéressées et étant statistiquement plus présentes sur la site), a été aussi mené pour tester la disposition à payer pour amener le cours d'eau à un bon état.
- (B) D'autres études similaires⁶⁹ viennent compléter le panorama des dispositions à payer géographiquement par Lignon du Velay, Sioule, et l'Indre et l'Hérault.
- (C) Une dernière enquête⁷⁰ a été menée en 1996 au bord de l'Erdre dont la qualité était classée de médiocre à passable en raison de l'excès de matières organique et du déficit en oxygène. L'échantillon, peu représentatif, comprend 37 personnes pour les baigneurs, et 21 pour les pêcheurs. Dans le cas de la baignade, le programme propose la création d'un club entretenant, surveillant et aménageant six plages vertes. Le prix d'un substitut (une piscine) leur est donné. Presque les trois quarts des individus s'avèrent souhaiter pouvoir se baigner dans l'Erdre. Pour la pêche, il comprend l'aménagement de zones de reproduction pour les poissons et la réintroduction de certaines espèces. Le prix moyen de la carte de pêche leur est donné en référence. Un peu plus de la moitié des pêcheurs jugent la qualité de l'Erdre suffisante pour pratiquer la pêche. Beaucoup de réponse présentent une capacité à payer nulle en raison d'une protestation sur l'utilisation des recettes de la carte de pêche.

Pêche – Promenade – Baignade - Kayak

	Loir (par an, € ₂₀₀₅)	Loir (par visite, € ₂₀₀₅)	Lignon (€ ₂₀₀₁)	Sioule (€ ₁₉₉₄)	Indre et Hérault (€ ₁₉₉₄)	Erdre (€ ₁₉₉₆)
<i>Pêche</i>	460	12.2	25/visite			
<i>Promenade</i>	672	15.6	14/visite			
<i>Canoë-kayak</i>	460	8.4		15 à 21/visite		
<i>Amélioration de l'état (usagers)</i>	34.8 (usagers limitrophes)		7 à 20 /an (pêcheurs) 6 à 12 /an (promeneurs)		7 à 14 /an (pêcheurs)	6,6/an ⁷¹ (pêcheurs) 26/an (baigneurs)
<i>Amélioration de l'état (non usagers)</i>	24.0 (non usagers limitrophes)		5/an			

⁶⁹ Lignon du Velay en 2001 par Bonnieux et al., 2002 ; Sioule en 1994 par Desaignes et al., 1998 ; Indre et Hérault par Armand et Bonnieux, 1999. Sources citées dans (Maresca et al., 2006)

⁷⁰ Source : « Amélioration de la qualité de l'eau : Bénéfices de la réalisation d'une réserve d'eau potable et bénéfices touristiques et récréatifs ». Auteur inconnu.

⁷¹ Soit une augmentation d'environ 14.5% du prix de la carte de pêche. Cette estimation est corrigée d'un individu jugé « aberrant ».

Les enquêteurs expliquent la différence du surplus de pêche entre le Loir et le Lignon par le fait que ce dernier comporte des salmonidés sédentaires plus attrayants pour les pêcheurs. Le Loir est plus lent et plus large que la Sioule, qui convient mieux pour la kayak sportif.

L'état du Lignon est déjà meilleur que celui du Loir d'après les auteurs pour les paramètres hydromorphologique, biologique et physico-chimique, ce qui peut expliquer une plus faible valeur pour le passage au bon état. Dans l'étude du Lignon, les personnes interrogées étaient statistiquement plus éloignées du cours d'eau, ce qui diminue la valeur associée au bon état des non usagers.

Dans le cas de l'Erdre, il est remarqué que certaines personnes interrogées répondent en pensant que l'amélioration du cours d'eau profitera à d'autres usagers, ce qui devrait être corrigé dans l'agrégation des bénéfices.

Protection contre le risque d'épuisement des ressources traditionnelles en eau

La protection contre le risque de non approvisionnement en eau figure au rang des externalités non marchandes, car les transactions sur les droits d'eau restent encore marginales et locales (J. Labre, 2003). Protéger sa population contre le risque de sécheresse par des ressources indépendantes de celles-ci figure pourtant parmi les premières priorités d'Etats comme l'Australie (Western Corridor Project, 2007).

Un portefeuille de ressources en eau peut être optimisé de même manière qu'un détenteur d'actifs financiers risqués pondèrera son portefeuille pour maximiser son utilité (M. Beuhler) :

- L'espérance de rendement est analogue au coût unitaire de production d'une ressource en eau ;
- La volatilité de l'actif financier s'assimile au risque intrinsèque de la ressource en eau, et notamment à sa dépendance au cycle hydrologique.

Une ville ou un Etat pourra ainsi vouloir ajouter dans son portefeuille de ressources en eau une quantité d'eaux usées réutilisables qui ne dépendra pas du risque de sécheresse à venir, et d'une manière générale sera dans une très large mesure décorrélée des ressources en eau traditionnelles.

Les auteurs ont noté qu'en Australie, dans l'Etat du Queensland, l'idée d'un approvisionnement équilibré entre ressource conventionnelle, dessalement et réutilisation d'eaux usées se répand.

j) Pertinence des externalités en fonction du niveau de développement socio-économique et environnemental

On peut intuitivement classer les externalités énumérées précédemment en fonction du type de pays où elles feront sens.

Externalité	Type	Pays en voie de développement	Pays développé
Externalités positives	<i>Eviter les coûts de déphosphatation</i>		X
	<i>Eviter une réduction du tourisme de la région en améliorant la qualité des eaux de surface</i>		X
	<i>Eviter des dommages à l'industrie – la conchyliculture</i>		X
	<i>Eviter des surcoûts de potabilisation</i>	(X)	X
	<i>Réduire le traitement de la DBO des eaux usées</i>		(X)
	<i>Profiter des nutriments en agriculture</i>	X	(un apport constant en nutriments peut être une gêne pour certaines cultures)
	<i>Accroître la valeur foncière par des usages décoratifs</i>		X
	<i>Apporter une protection écologique et accroître la qualité de l'eau pour les usages récréatifs</i>		X
	<i>Améliorer la santé publique</i>	X	
	<i>Apporter un flux régulier</i>		X
	<i>Sécuriser un approvisionnement en eau</i>	(X)	X
Externalités négatives	<i>Dégrader les sols</i>	X	X
	<i>Gérer les sous-produits du traitement (e.g. saumure).</i>		X

Soulignons qu'en fonction des pays, la législation locale ou régionale peut déjà avoir reflété l'inclination de la population à protéger son environnement. Dans ce cas, l'externalité de réutiliser des eaux usées sera minorée en cas de respect de la réglementation. C'est le cas par exemple de l'Union Européenne⁷². Dans d'autres cas (celui d'Arras par exemple), la qualité de la rivière locale (la Scarpe) est si médiocre que le rejet d'eaux usées traitées permet déjà d'en améliorer sa qualité... il n'est donc pas évident de prôner l'absence de rejet dans le milieu naturel.

Cependant, pour la France, dont seulement 83% des stations d'épuration dimensionnées pour plus de 2.000 équivalents habitants étaient aux normes européennes en 2006 (JDLE, 2006), les externalités environnementales de la réutilisation après retraitement peuvent encore dans certains cas faire sens, et particulièrement pour les cours d'eau menacés par la non atteinte du

⁷² La réglementation française limite, en fonction de la charge brute de pollution organique reçue par le milieu chaque jour, à 10-15mg/l la concentration maximale d'azote des eaux usées traitées pour les zones réceptrices sensibles à cet élément ; et de même manière à 1-2mg/l pour le phosphore.

bon état défini par la directive cadre européenne. Alternativement, la mise aux normes d'une station peut profiter à un projet de réutilisation dont le coût serait abaissé.

D'un autre côté, la tendance à la multiplication des critères de potabilité augmente le coût de production d'eau potable, et augmente comparativement l'intérêt de la réutilisation des eaux usées, lorsque sa réglementation prend en compte l'usage non potable de celles-ci. Entre 1989 et 2001 en France, 19 critères de potabilité ont été ajoutés pour seulement 9 supprimés (MEDD, 2001).

2. Eau virtuelle, eau agricole : la valeur ajoutée de l'eau

L'eau virtuelle est un concept né dans les années 1990 pour évaluer l'eau consommée durant la production de biens, y compris la nourriture. L'eau n'est plus nécessairement comprise dans le bien final, mais a transité à travers le processus de production. Par exemple (Hoekstra et al., 2006) :

Produit	Contenu en eau virtuelle (l)
1 verre de bière (250ml)	75
1 verre de lait (200ml)	200
1 tasse de café (125ml)	140
1 tasse de thé (250ml)	35
1 tranche de pain (30g)	40
1 pomme de terre (100g)	25
1 pomme (100g)	70
1 t-shirt en coton (250g)	2000
1 feuille de papier A4 (80g/m ²)	10
1 hamburger (150g)	2400
1 paire de chaussures (en cuir bovin)	8000
1 œuf (40g)	135
1 tomate (70g)	13
1 orange (100g)	50

Mis en regard du coût de la vie dans différents pays, de l'efficacité industrielle ou du mix de fabrication local, on peut calculer que, pour les produits industriels (même source) :

Industrie	l/US\$
Mondiale	80
USA	100
Allemagne, Hollande	50
Japon, Australie, Canada	10-15
Chine, Inde	20-25

Une estimation de la marge nette acceptable par les industriels régionaux donne une idée de leur capacité à payer supplémentaire pour l'eau. Elle est nettement supérieure à celle des agriculteurs qui consomment pour irriguer une quantité d'eau beaucoup plus grande par unité de chiffre d'affaire, et ce même dans des pays développés.

a) Australie

On recense les grandeurs suivantes⁷³ pour ce pays développé:

Culture	Retour sur l'eau d'irrigation (€/m ³)	Utilisation d'eau (10 ³ m ³ /ha)
Légumes	0.74	3
Fruits	0.73	7
Raisin	0.34	8
Coton	0.26	7
Arachides	0.05	3
Foin	0.03	4
Riz	0.02	11

Le prix de l'eau est donc très contraint par le faible chiffre d'affaire réalisé par litre.

b) Mexique

Le cas du Mexique (à Juarez) apporte des conclusions semblables (D. Lamotte, 2002) :

Culture	Retour sur l'eau d'irrigation (€/m ³)	Dont bénéfice sans subvention (€/m ³)	Utilisation d'eau (10 ³ m ³ /ha)
Coton	0,06	0,02	12,9
Luzerne	0,07	0,05	18,8
Blé	0,05	0,02	12,3
Avoine	0,04	0,01	12,1
Prairie	0,04	0,01	17,3
Sorgho	0,07	0,05	13
Arboriculture	0,09	0,07	18,4

L'étude de cas menée évoque la possibilité de facturer une eau usée traitée à des fins agricoles à un peu moins de 0,1 US\$/m³ (comparé au prix fixable pour les industriels évalué entre 0,4 et 0,6 US\$/m³).

c) France

Enfin en France, Thierry Rieux et Guy Gleyses du Cemagref Montpellier ont travaillé (Rieux et al., 2003) sur la capacité de financement des agriculteurs concernant l'eau. Ils trouvent environ **11 centimes d'€/m³**. Cette disposition à payer pour l'eau est indépendante des types d'eau ou des technologies disponibles pour la mettre à disposition, c'est plutôt une fonction de leur marge économique à l'hectare irrigué (qui dépend de la culture exploitée). C'est donc cette valeur qu'il faut considérer comme donnée pour construire une solution de régénération pour réutilisation agricole viable autour : le raisonnement est inversé par rapport à celui habituel.

⁷³ D'après : « Australia's Natural Resources: 1997-2002 and beyond » (http://audit.ea.gov.au/ANRA/docs/final_report/final_report_water.cfm)

Il faut aussi insister sur le fait que l'agriculture, en France tout du moins, est largement subventionnée, par la PAC en particulier, et n'applique que très faiblement le principe pollueur-payeur :

	Part de pollution organique	Part de pollution nitrates	Part de pollution pesticides	Redevance pollution
<i>Consommateurs</i>	35%	20%	10%	89%
<i>Agriculteurs</i>	33%	74%	90%	1%
<i>Industriels</i>	32%	6%	-	10%

Source : IFEN-agreste-Agence de l'eau-Sénat

Enfin, la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques de 2006 « crée un fonds de garantie spécial visant à couvrir les dommages imprévisibles liés à l'épandage de ces boues sur les terres agricoles », « afin de promouvoir une élimination durable des boues d'épuration ». On pourrait envisager d'étendre ce principe intéressant si les agriculteurs se montraient trop averses au risque imprévisible de la réutilisation agricole des eaux usées lié, par exemple, aux substances inconnues contenues dans celles-ci : les agriculteurs rendent, d'un certain point de vue, service aux urbains en les débarrassant de leurs effluents polluants pour le milieu naturel.

La faible capacité à payer des agriculteurs, même malgré des externalités positives comme la présence de nutriments dans les eaux usées traitées, met en évidence la nécessité d'avoir un second acteur –urbain ou industriel- qui puisse participer au projet et apporter du financement. C'est par exemple le cas à Salina Cruz, au Mexique.

Agriculture familiale en France

L'agriculture la plus solvable en France pourrait bien être, comme suggéré par V. Lazarova, celle de ces quelques 25 millions de Français qui cultivent un verger ou un potager (CSA, 2007), sur une portion de terrain souvent limitée (20 à 50m² en général). Ces nouveaux maraîchers attendent en sus du plaisir de cultiver la terre des économies qui peuvent monter, pour 200 m² bien entretenus, à 1200€ annuels.

Ces agriculteurs familiaux, attachant beaucoup d'intérêt à leur lopin de terrain, ressentent vraisemblablement beaucoup de frustration lorsqu'un arrêté préfectoral leur interdit d'arroser leur jardin. Leur capacité à payer pour de l'eau, même usée et traitée, doit être assez élevée.

Il est cependant nécessaire de réaliser que l'adduction d'eau régénérée à ceux-ci, même restreinte au périmètre urbain voire périurbain, entraînera la construction d'un second réseau sûrement très onéreux.

3. Contextes des secteurs de l'eau en Australie et au Mexique

Après ces considérations théoriques sur l'économie de la réutilisation, il convient de regarder d'un point de vue plus pratique le fonctionnement du secteur de l'eau dans lequel s'inscrit la réutilisation ainsi que les projets concrets que les auteurs ont appréhendés durant leur étude en Australie et au Mexique.

Il faut d'abord souligner les cadres distincts, dans lesquels se développe la réutilisation en Australie et au Mexique d'un point de vue économique et financier, qui est essentiellement due aux différents systèmes de tarification de l'eau potable et régénérée dans les deux pays.

a) Situation du secteur de l'eau australien

L'eau en Australie est gérée en grande majorité par des sociétés d'eau publiques appartenant aux Etats fédérés ou aux collectivités locales. Au sein de la zone de distribution d'une société, l'eau est facturée par celle-ci comme un « timbre poste »⁷⁴, i.e. au même prix pour tous les usagers. Notons cependant l'exception de l'Etat de New South Wales (dans lequel se situe Sydney) : ici, le prix de l'eau est fixé par un régulateur économique indépendant, IPART (Independent Pricing and Regulatory Tribunal). En première approximation, le prix de l'abonnement annuel pour l'eau se situe autour de 150 AUD, auquel s'ajoute une facturation volumique, le m³ variant entre 0,5 et 1,50 AUD (prix parfois croissant avec la consommation d'ailleurs) et s'approchant généralement de 1 AUD, soit environ 0,63 €. Pour comparaison, le prix de l'eau en France est estimé au alentours de 2,85€ par m³⁷⁵. L'assainissement et l'épuration sont souvent uniquement couverts par un abonnement forfaitaire (auquel s'ajoute dans quelques rares villes un tarif au volume consommé au compteur de l'habitation). En première approximation, il s'élève à environ 300 AUD par an.

Il y a 20 ans, il n'existait qu'un abonnement calculé en fonction de la valeur du terrain du logement concerné et qui donnait droit à un certain volume de consommation, au-delà duquel il fallait payer au m³. A cette époque, les usagers commerciaux payaient des factures plus élevées et subventionnaient ainsi les clients résidentiels. En 1994, la tarification en deux parties (fixe et variable) a été difficilement introduite.

Shaun Cox, PDG de Gold Coast Water, pose la question centrale à cet égard : Le prix de l'eau doit-il permettre le recouvrement des coûts ou la modération de la demande ? Selon Chris Davis de la Australian Water Association, il n'y a aujourd'hui plus de volonté politique pour éliminer la partie fixe et inclure tous les coûts dans la partie variable du prix, ce qui pourrait avoir un effet plus incitatif sur la consommation des gens. En outre, Davis plaide pour une augmentation du prix de l'eau à au moins 2 AUD/m³.

Le prix de l'eau très faible en Australie peut s'expliquer par trois facteurs principaux :

- la disponibilité historique d'eau potable de bonne qualité (à travers environ 500 barrages sur le continent) nécessitant peu de traitement ;
- les volumes de consommation d'eau importants (entre 300 et 400 litres par personne et par jour, contre seulement 100 à 200 en France) ;

⁷⁴ « postage stamp pricing » en anglais

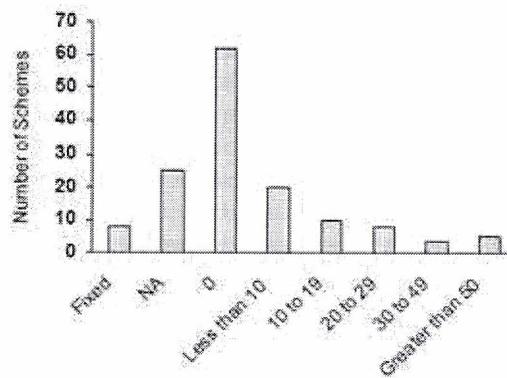
⁷⁵ Source: <http://www.cieau.com/toutpubl/sommaire/texte/7/f74.htm>

- le fait que les sociétés d'eau publiques n'aient pas repris la charge d'amortissement des infrastructures de réseaux qui ont été financées par les pouvoirs publics avant la création de ces sociétés.

Le système actuel permet aux sociétés d'eau de dégager des bénéfices considérables lesquels sont généralement reversés dans le budget des Etats et collectivités. Le taux de retour sur capital investi varie ainsi entre 10 et 12,5% pour Gold Coast Water. South Australian Water a réalisé en 2004/2005 un bénéfice record de 288 millions AUD (dont 165 millions ont été distribués en dividendes) –à comparer à un revenu de 776 millions–, pour un taux de retour sur son capital d'environ 6%. Enfin, la Sydney Water Corporation a versé 115 millions AUD de dividendes, avec un taux de retour d'environ 4% pour cette même année (WSAA, 2005a).

Cette situation a un impact sur la tarification de l'eau régénérée. Dans son étude sur la tarification de l'eau régénérée en Australie, WSAA (2005b) a fait une enquête sur 142 projets existants. Dans 44% des cas, les usagers de l'eau régénérée ne paient pas du tout pour celle-ci, même si les autorités souhaitent la facturer à l'avenir. Seulement quelques projets tarifient l'eau réutilisée à plus de 0,50 AUD par m³. Le Tableau 3 résume les résultats de l'enquête.

Tableau 3
(distribution du prix de l'eau régénérée, ct/m³)

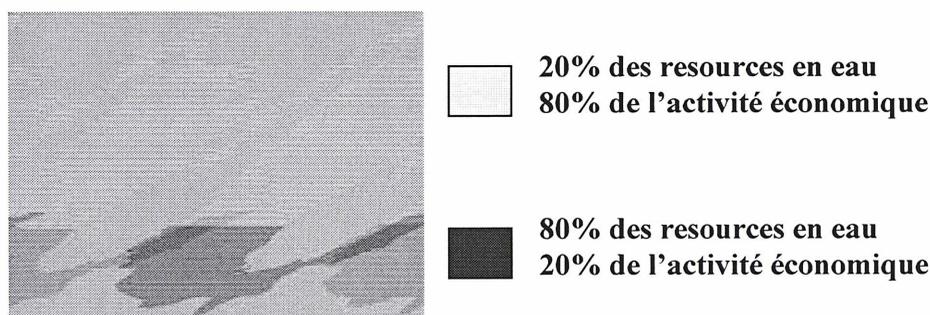


WSAA remarque aussi une tendance croissante à l'implication du régulateur dans la détermination du prix de l'eau régénérée. Il peut notamment vérifier les termes des contrats d'approvisionnement et la validité du bénéfice économique, environnemental et social (« triple bottom line ») de ces projets. L'Initiative Nationale de l'Eau signée par tous les Etats leur demande aussi de rapprocher la tarification de l'eau régénérée et de celle de l'eau potable, afin de stimuler l'utilisation économe de l'eau, quelle que soit son origine. L'avenir nous dira si une plus faible attractivité tarifaire de l'eau régénérée peut être compensée par une citoyenneté plus marquée.

b) Situation du secteur de l'eau mexicain

Les ressources d'eau mexicaines sont gérées par la Commission nationale de l'eau (CNA). Celle-ci estimait en 2004 que 93% des bassins hydrographiques du pays étaient pollués, dont 19% fortement. En outre, les ressources sont très inégalement réparties entre le Nord (20% des ressources d'eau, mais 80% de l'activité économique) et le Sud du pays (80% des ressources, mais seulement 20% de l'activité).

Graphique 1



Source : Degrémont Mexique

Pour répondre à ces contraintes, les prélèvements d'eau par les différents usagers sont concédés par la CNA et facturés à un prix variant en fonction de zones de disponibilités (Tableau 4).

Tableau 4

Zone de disponibilité	Prix pour le prélèvement d'eau de sources superficielles ou souterraines (à l'exception de l'eau de mer), pesos/m ³
1	16,5665
2	13,2527
3	11,0438
4	9,1113
5	7,1783
6	6,4876
7	4,8831
8	1,7349
9	1,3002

Source : Commission Nationale de l'Eau

En outre, il y a un droit de l'eau à payer en fonction de l'usage par 1.000 m³ prélevés. Concernant l'eau potable, les municipalités doivent payer ce droit (qui doit permettre de financer les oeuvres d'infrastructures hydrauliques) pour une consommation inférieure ou égale à 300 L/jour et personne, en fonction de la zone de disponibilité (Tableau 5). Pour la consommation dépassant ces volumes, le prix par 1.000m³ double.

Tableau 5

Zone de disponibilité	Prix en pesos/1.000m ³
1 – 6	328,1859
7	152,8585
8	76,3181
9	37,9897

Concernant l'eau utilisée dans les centrales hydroélectriques, le droit est fixé à 3,4824 pesos/1.000m³ pour toutes les zones. Pour les usages agricoles, chaque m³ excédant le volume de la concession est facturé 0,1173, pesos quelle que la zone de disponibilité.

Les municipalités sont responsables de l'exploitation du service public d'eau, mais parfois les recettes de l'eau sont dirigées vers d'autres usages plus prioritaires politiquement (déchets,

etc). Plus de 50% des municipalités ne facturent pas du tout l'assainissement ou l'épuration, même s'ils ont une station de traitement, ce qui montre la difficulté qu'elles ont à imposer l'acceptation du coût de ce service politiquement.

En 2000/2001, celles-ci ont payé 25 millions de pesos (environ 1,7 M€) à la CNA. En 2006/2007, ce montant est passé à 160 millions de pesos, soit environ 11 M€. Mais il reste à 50% du volume potentiel, malgré le fait que la CNA redistribue cet argent en finançant des infrastructures destinées à l'amélioration des performances et des services. Une pression plus forte du services des impôts mexicain devrait améliorer la situation dans les années à venir, 50 municipalités ayant été notifiées sur les 2.300 existantes. En outre, un règle a été instaurée selon laquelle pour tout peso investi par la CNA, la municipalité bénéficiaire doit contribuer d'un peso.

De manière générale, les agriculteurs ne paient pas leur eau, tandis que l'industrie et le secteur touristique subventionnent les autres usages. A noter que les agriculteurs sont les plus importants consommateurs d'eau usée non traitée, dans un pays où seulement 36% des eaux usées municipales sont traitées aujourd'hui.

4. Les facteurs déterminants du choix de réutilisation dans les projets étudiés

Les deux pays que nous avons visités rencontrent des contraintes importantes de rareté de l'eau dans certaines régions : tout le Sud et l'Est du continent australien, les plateaux centraux et le Nord du Mexique. Mais les contextes économiques et financiers des secteurs de l'eau et de la réutilisation en Australie et au Mexique façonnent les incitations et les facteurs de décision pour et contre la réutilisation dans les deux pays.

En **Australie**, la réutilisation est poussée par la réglementation sur la qualité des effluents de stations d'épuration et le rejet dans le milieu naturel, alors que le prix de l'eau n'y est pas très favorable. En effet, la tarification de l'eau potable pose des problèmes évidents en termes d'incitations économiques pour la réutilisation, car il est très difficile selon Chris Davis de l'AWA de vendre des eaux usées traitées à un très haut niveau pour moins de 1,50 AUD. Les projets de réutilisation s'insèrent dans une initiative nationale lancée en 2004, laquelle vise notamment une gestion plus efficiente de l'eau en milieu urbain, par exemple par l'utilisation croissante d'eaux régénérées et d'eau de pluie⁷⁶. L'initiative a permis la mise en place de subventions massives gérées par la National Water Commission. Elle s'accompagne par des travaux de standardisation des normes et des usages, qui ont donné lieu en 2006 à l'adoption d'un premier document national sur la réglementation du secteur (NRMMC, 2006).

Les résultats de l'enquête WSAA (2005b) concernant les facteurs-clés en faveur de la réutilisation confirment cette analyse. Pour plus de 55% des projets, l'impact environnemental, i.e. la réduction des effets des effluents traités sur le milieu aquatique, était déterminant. La possibilité de traiter et de valoriser un effluent considéré jusqu'alors comme déchet comptait pour 32%, l'effet de substitution avec l'eau potable pour 25% des projets. Un objectif de développement économique existait dans 13% des cas étudiés. La rentabilité économique de la réutilisation n'est pas mentionnée. Pour autant, les externalités positives (« public good ») semblent avoir joué un rôle dans 35% des cas. Enfin, certains projets semblent avoir profité de conditions de mise en oeuvre particulières favorisées par les autorités (les raisons mentionnées sont alors « opportunistique » ou des « ministerial conditions »).

Par opposition, le **Mexique** ne connaît pas cette politique très volontariste au niveau fédéral ou étatique en faveur de la réutilisation. Partant d'un niveau très bas en termes de traitement des eaux usées et de régulation environnementale, la CNA voit la réutilisation avant tout comme un moyen de rendre l'épuration plus populaire auprès des collectivités locales et de faciliter ainsi sa facturation.

En effet, la réutilisation peut être un moyen pour les municipalités de se mettre en conformité avec la réglementation des effluents, ce qui leur éviterait de payer des pénalités à la CNA. La CNA peut aussi décider de baisser ses droits sur les prélèvements d'eau si la municipalité développe un projet de réutilisation.

Pour autant, il n'existe pas de fonds spécialement dédié à la réutilisation. Mais les outils de financement existants, notamment pour l'eau potable en zone urbaine ou pour la contractualisation avec des opérateurs privés (BOT), subventionnent aussi des projets de réutilisation, en moyenne à hauteur de 40-60%. En particulier, tous les projets subventionnés

⁷⁶ Source: National Water Commission: <http://www.nwc.gov.au/nwi/index.cfm#overview>

par le fonds FINFRA/PROMAGUA (au maximum 40% du montant du projet) doivent être soumis à une analyse d'impact social incluant l'usage de l'eau régénérée et sa rentabilité.

Néanmoins, le contexte de la tarification de l'eau potable est plus favorable au développement de la réutilisation, du moins dans les zones de disponibilité 1 à 3. C'est ainsi que des initiatives privées participent au développement du secteur et à l'émergence d'un marché de l'eau régénérée.

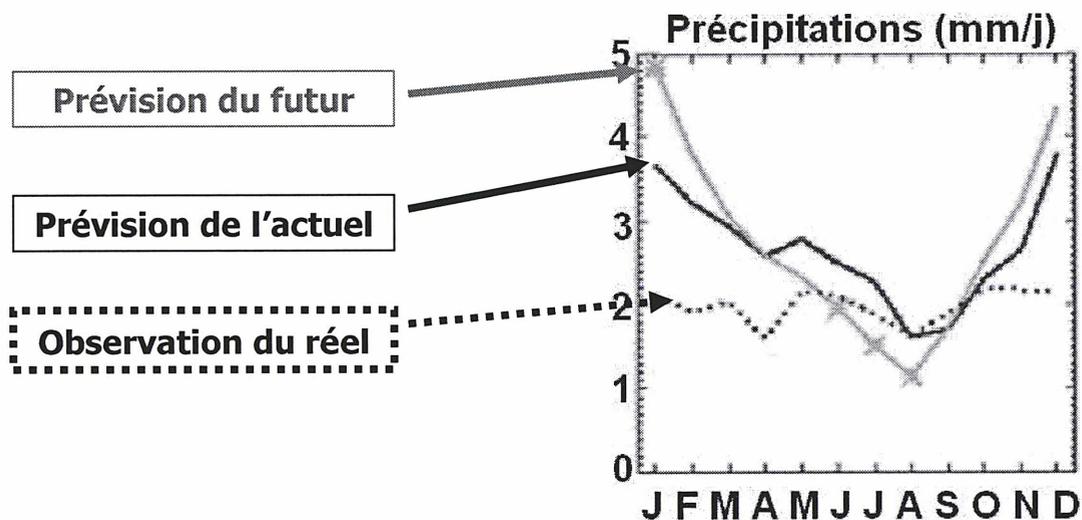
Dans les autres zones cependant, le tarif de l'eau qu'impose la CNA est pour l'instant trop faible (trop subventionné) pour inciter les municipalités à opter pour des projets de réutilisation. Etant donné la structure fédérale du pays et les pressions politiques existantes (notamment des gouverneurs des Etats), la situation est difficile à changer.

Enfin, la CNA a avoué au binôme que si certaines municipalités ont des idées sur une meilleure gestion des ressources d'eau, la majorité d'entre elles n'est en général pas très volontariste. Ceci serait souvent dû à l'incompétence dans le secteur des présidents municipaux. Et la courte durée des mandats politiques au niveau local (3 ans contre 6 au niveau des Etats) ne laisse pas assez de temps pour fédérer suffisamment de soutiens politiques autour de tels projets novateurs.

a) Rareté

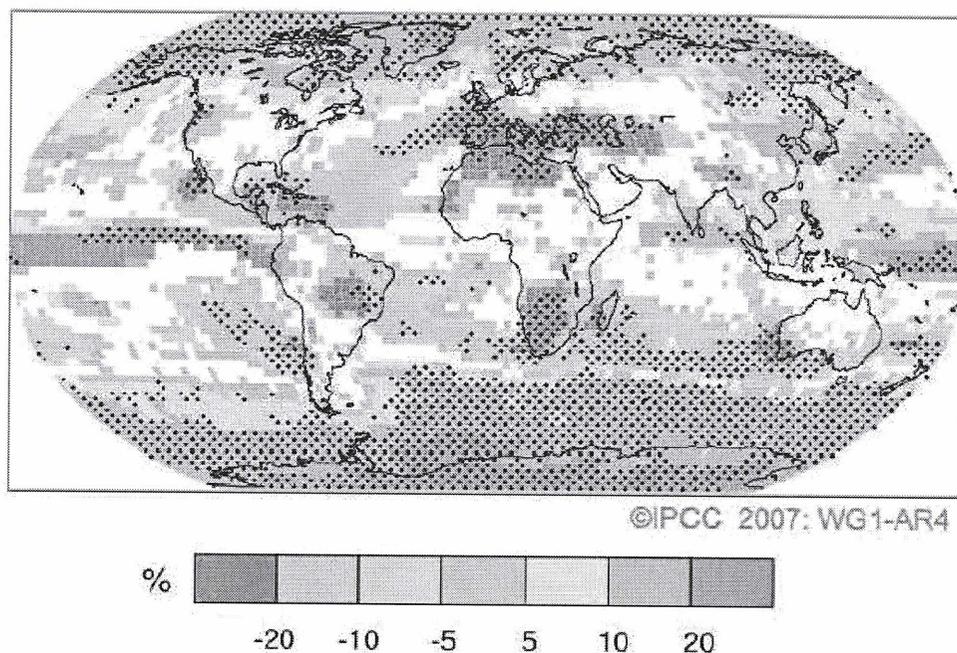
Le principal facteur de la réutilisation dans différentes parties du monde est la rareté de l'eau. Lazarova (2007b) souligne l'accroissement de la population, l'urbanisation et le développement industriel comme causes de cette raréfaction de la ressource. Mais le changement climatique contribuera à aggraver cette tendance dans certaines régions du monde, notamment dans les régions du pourtour méditerranéen. Certes, les modèles de prévision des précipitations sont entachés de grandes incertitudes, comme le démontre notamment le modèle ARPEGE (Graphique 2). Si le modèle indique bien une baisse des précipitations pendant les mois estivaux futurs par rapport à sa prédiction pour le présent, cette même prédiction dévie pour autant fortement des observations réelles de précipitations actuelles (Ducharme et al., 2003).

Graphique 2 : Estimations de précipitations pour le bassin de la Seine, basées sur les données observées entre 1970 et 1989 (scénario A2)



Cependant, les scientifiques réunis dans le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) s'accordent dans leur dernière publication pour prédire des changements majeurs dans les schémas de précipitations d'ici 2100 pour plusieurs régions du monde : le pourtour méditerranéen, le Moyen Orient, l'Amérique latine et le Brésil, l'Afrique du Sud et l'Australie du Sud (Graphique 3). Le graphique illustre la situation particulièrement dramatique pour la région méditerranéenne qui pourrait perdre 20% de ses précipitations estivales d'ici un siècle (GIEC, 2007). Ces évolutions pourraient créer un risque de manque d'eau pour 1,7 milliards d'hommes sur la planète, si la température moyenne augmente de seulement 1 degré Celsius d'ici 2050, 2,2 milliards pour 2 degrés et 2,6 milliards pour 3 degrés.

Graphique 3 : projections de changement des précipitations pour la période 2090-2099, mois de juin, juillet et août. Scénario A1B.



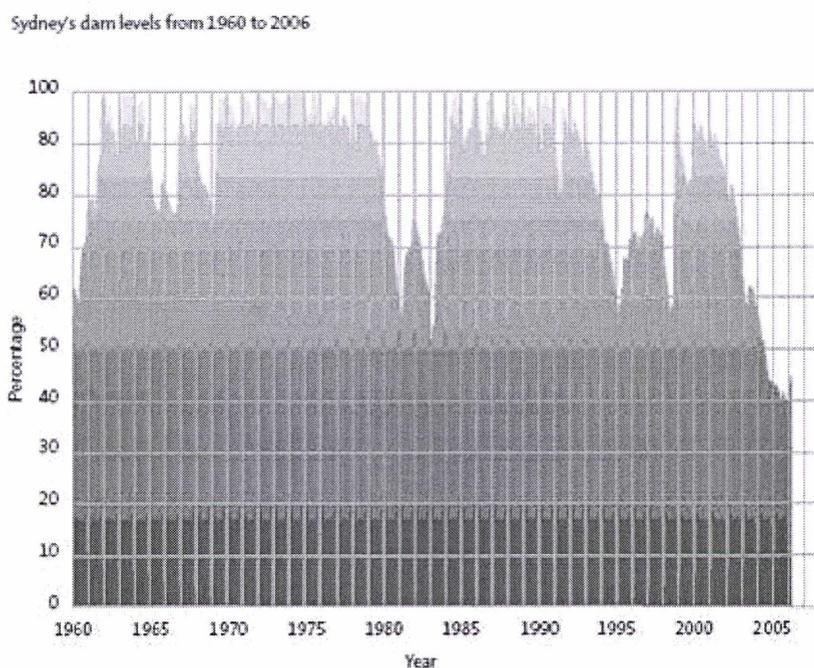
En situation de rareté de l'eau, l'enjeu des coûts d'approvisionnement en eau est nécessairement modifié, surtout s'il y a une demande solvable pour des volumes importants (ce qui n'est pas le cas des pays les plus pauvres). Mais l'adduction d'eau sur une longue distance est alors mise en concurrence avec des solutions alternatives aux approvisionnements traditionnels (barrages en Australie, nappe phréatique au Mexique), comme le dessalement et la réutilisation des eaux usées. C'est pour cette raison que le coût de la réutilisation doit être non seulement comparé avec le coût de distribution d'eau potable, mais aussi avec le coût du dessalement pour des villes en bord de mer comme Sydney.

Pour ce qui est des villes visitées en Australie, toutes font face à des niveaux de leurs barrages extrêmement bas. Ainsi, le niveau des barrages d'Adélaïde est à environ 37% de sa capacité, celui de Sydney à 37% (Graphique 4) et celui de Brisbane à seulement 18% même. Sydney Water nous a confirmé que la manque d'eau était l'un des facteurs premiers pour avoir envisagé la réutilisation. Selon le rapport final de révision du Metropolitan Water Plan pour Sydney (White et al., 2006), le changement climatique sur le niveau du plus grand barrage (Warragamba) pourrait entraîner un déficit de 50M m³ par an d'ici à 2015, si la ville ne réussit pas à réduire la consommation par tête (estimée actuellement à environ 425l/personne et jour). C'est dans ce contexte que le plan prévoit la production d'environ 70M m³ d'eau régénérée d'ici à 2015, soit plus de 10% de la demande totale.

Photo 9 : Vue aérienne d'un des barrages dans l'arrière-pays de Sydney

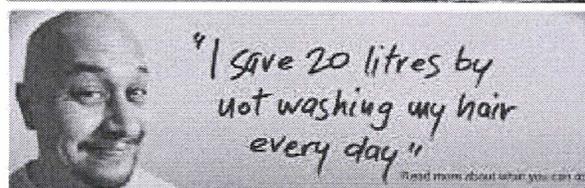
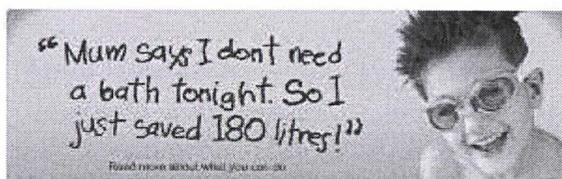
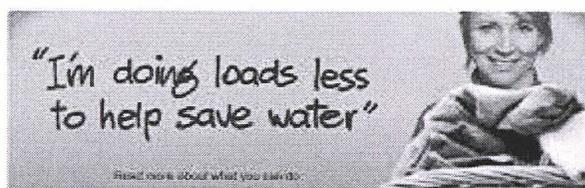
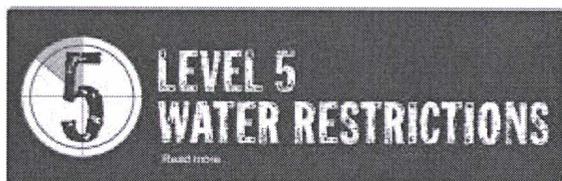


Graphique 4 : Niveau des barrages alimentant Sydney, 1960-2006 (Source : Sydney Metropolitan Water Plan 2006)



Face à cette situation, les pouvoirs publics ont imposé différents niveaux de restrictions d'usage qui s'accompagnent d'une communication intense sur les économies d'eau comme illustré ci-dessous dans le cas de la Queensland Water Commission (Photo 10).

Photo 10 : Exemple de bandes-annonces sur le site de la Queensland Water Commission (<http://www.qwc.qld.gov.au/>)



Jolyon Burnett de la Irrigation Association of Australia argumente que ce sont surtout les conseils municipaux qui, face à la sécheresse, ont poussé l'idée de la réutilisation des eaux usées comme celle des eaux de pluie ces dernières années, car les villes sont de grandes consommatrices d'eau pour l'irrigation de leurs terrains de sport, jardins, parcs et piscines publics et disposent des moyens financiers pour s'assurer une ressource fiable.

Dans le cas de San Luis Potosí au Mexique, l'eau potable de la ville provient à 90% de l'aquifère, les 10% restants venant des eaux de surface, qui sont incertaines car dépendantes des précipitations. Au courant des dernières années, l'aquifère a enregistré un déficit de 40 millions de m³/an qui était le résultat de prélèvement à hauteur de 120 millions de m³ pour seulement 80 millions de recharge. Ceci a contribué à une baisse de la nappe d'environ 2 mètres par an.

b) Règlementation et amélioration environnementale

Dans la plupart des pays développés, la réglementation représente l'incitation la plus importante pour réutiliser des eaux usées après l'occurrence de la rareté (ou même avant, si celle-ci n'est pas suffisamment contraignante). Etant donnée l'existence de normes environnementales et sanitaires de plus en plus strictes, la réutilisation apparaît comme une réponse optimisée de gestion des eaux usées et surtout de leur rejet dans l'environnement.

L'Australie est une bonne illustration de ce constat général. Le premier projet de réutilisation résidentielle dans le quartier de Rouse Hill à Sydney n'a ainsi pas été décidé en fonction de la demande d'eau, mais bien à cause de normes jugées trop contraignantes. Dans le cadre d'un nouveau développement immobilier en 1990 à Rouse Hill, il s'est avéré que le respect des normes environnementales de contrôle des rejets dans la rivière la plus proche serait compliqué et cher. C'est face à ce constat que Sydney Water Corporation a lancé un projet de réutilisation pour les toilettes et l'arrosage privé et public en double réseau.

La situation est similaire dans le cas de la station d'épuration de Bolivar près de Adélaïde (opérée par une société du groupe Véolia). Les autorités environnementales avaient beaucoup critiqué le développement d'algues dans la baie de l'océan, dans laquelle était rejetés les effluents de la station. C'est donc la pression politique croissante sur le propriétaire South Australian Water pour rejeter des effluents moins riches en matière organique qui a été à l'origine de la construction d'un traitement d'aération et de floculation-flottation. Le resserrement des normes environnementales pourrait pousser à investir davantage pour traiter encore plus d'eau à un standard de réutilisation.

Pour autant, l'incitation réglementaire existe aussi dans le cas du Mexique, notamment pour les effluents industriels et commerciaux. Mais la politique des autorités mexicaines vise à favoriser des projets industriels avec des externalités positives pour la population environnante. Ainsi, la municipalité de San Luis Potosí a pu s'équiper d'une STEP à moindre coût parce qu'il y avait une participation (de l'ordre de 80%) de CFE, la compagnie fédérale d'électricité qui avait besoin d'eaux de refroidissement pour sa centrale. Aujourd'hui, CFE achète l'eau retraitée à la Commission d'Eau de l'Etat (CEA), ce qui permet de financer 44% du coût du traitement, le reste étant financé par le gouvernement fédéral. La CFE a accepté cette solution pour diversifier son approvisionnement en eau par rapport aux puits de forage existants (pour lesquels elle dispose d'une concession CNA). La CEA obtient une eau d'irrigation agricole de meilleure qualité et améliore ainsi la situation de la ressource au niveau global. Néanmoins, la CFE utilise aujourd'hui moins d'eau régénérée que prévu contractuellement, parce qu'elle continue à pomper dans les forages existants pour ne pas en perdre le droit d'exploitation. Cette situation a entraîné une procédure juridique qui est encore en cours.

A Salina Cruz, la population de la ville qui bénéficie de l'assainissement collectif ne le paie pas. C'est le pétrolier PEMEX qui couvre grâce à son tarif le traitement des effluents municipaux (qui représentent environ 30% du traitement, hors dessalement) et l'amortissement de l'investissement initial. L'incitation pour lui était avant tout de ne plus rejeter d'eau résiduaires industrielles à l'océan, ce qui a permis la construction de la STEP. En effet, PEMEX redoutait des procès de la pêcheurs de la région l'accusant de détruire les ressources piscicoles de la côte.

Enfin, le projet Baja de Mexico envisageait de traitement de l'eau de la capitale (volume d'environ 40m³/sec) afin de rendre possible l'irrigation de cultures à plus forte valeur ajoutée, qui est interdit en l'état actuel (irrigation avec de l'eau usée non traitée). L'argument employé par les promoteurs du projet est que le fourrage a un rendement d'environ 2,5T/ha et peut se vendre à 500 pesos/T, tandis que le maïs ou les tomates donnent 8-9T/ha, mais avec des prix de marché atteignant les 8.000 pesos/T. Le projet n'a cependant pas encore vu le jour.

Dans les pays où la réglementation n'est pas encore aussi développée que dans les pays industrialisés, la réutilisation se fait donc aussi dans une perspective d'optimisation des usages de l'eau usée traitée en fonction de la loi : celle-ci sera respectée tout en maximisant le bénéfice économique. Ainsi, l'étude du projet de réutilisation d'eaux usées de la station d'épuration de Tunis-Ouest a développé des solutions de valorisation agricole des eaux usées traitées sous contrainte technico-économique qui permettent de maximiser les bénéfices du projet, tout en soulignant que si la réglementation évoluait avec l'adoption d'un traitement tertiaire rendant possible les cultures maraîchères en particulier, la rentabilité de l'investissement serait fortement augmentée (BRLi/SCET, 2002).

Mentionnons enfin les externalités environnementales que considère la National Water Commission australienne pour la sélection des projets subventionnés. La question qui se pose par rapport aux ressources existantes est la suivante : combien d'eau peut-on prélever d'une ressource pour qu'il en reste assez par ailleurs pour l'environnement. Le fleuve Murray par exemple débordait autrefois régulièrement de son lit pour irriguer les terres proches et favoriser ainsi le développement d'arbres d'eucalyptus dans les environs. Aujourd'hui, avec les barrages, l'eau du fleuve sert principalement à l'irrigation pendant l'été. Le gouvernement fait des « paiements d'ajustement » aux agriculteurs qui auparavant prélevaient des volumes excessifs dans la rivière, afin de préserver un débit minimal pour le cours d'eau.

Enfin, dans le cas de la France (H. Sevin, 1997), la réglementation qui protège les usages littoraux (conchyliculture : directive CEE du 30/10/1979, baignade : directive CEE du 08/12/1975 et décret du 20/09/1991 ; tous types d'usages : décret du 19/12/1991) exige l'absence ou la limitation des rejets, et milite donc indirectement pour des solutions innovantes comme la réutilisation des eaux usées, ou moins méritoires comme le simple déplacement du point de rejet via un émissaire en mer.

c) Proximité du lieu de réutilisation

Un facteur de coût déterminant est la proximité entre le site de production de l'eau réutilisée et le lieu de son utilisation qui évite la construction de réseaux sur des grandes distances.

Dans le cas de Sydney, les grandes stations d'épuration sont situées sur la côte, tandis que les quartiers susceptibles de pouvoir bénéficier d'eau régénérée sont de l'autre côté de la ville à plusieurs dizaines de kilomètres des côtes. La réutilisation résidentielle de ces eaux usées n'est donc pas étudiée. Mais différents projets industriels se sont avérés rentables à cause de la proximité avec le client. Malgré tout, Bob Hayward et Terry Simms de Sydney Water soulignent l'effet volume qui peut compenser une distance importante. Ainsi, une aciérie a pu bénéficier d'un projet de réutilisation grâce à sa consommation d'eau importante et donc d'un prix plus intéressant que celui offert aux clients agricoles qui étaient certes plus proches de la station de traitement, mais qui auraient consommé moins (les deux prix qui nous sont indiqués sont 0,6 et 1 AUD/m³).

Dans le cas de Brisbane, le gouvernement du Queensland a étudié la possibilité de faire du dessalement. Mais le fait que la baie la plus proche est très peu profonde aurait nécessité la construction d'un long émissaire au large des côtes. En outre, le dessalement était perçu par l'opinion publique comme fortement consommateur d'énergie (environ 3 kWh/m³ d'eau dessalée). C'est ainsi que la priorité a été donnée à un vaste projet de réutilisation (Western Corridor Project).

Dans le cas d'Arras en France, la station de traitement des eaux usées de Thélus était trop éloignée (au moins 8km) des consommateurs potentiels d'eaux usées traitées. De plus, les STEP de la région tirent parti du relief local pour bénéficier d'un écoulement gravitaire, si bien qu'elles sont proches de la rivière et donc localisées dans des milieux humides qui n'ont pas besoin d'eau pour l'instant.

Le coût de construction d'un deuxième réseau pour la réutilisation résidentielle représente un frein économique majeur pour de tels projets, surtout pour des habitations existantes. Pour de nouveaux développements, le double réseau revient certes plus cher, mais son coût n'est alors pas prohibitif. Selon Peter Donlon de la Water Service Association of Australia, l'ajout d'une troisième conduite pour les eaux régénérées augmente les investissements d'environ 50%, tout en ajoutant aussi des risques d'approvisionnement. En effet, le réseau pour la réutilisation doit avoir des dimensions suffisantes pour pouvoir alimenter des usages à forte consommation qui peuvent avoir lieu simultanément, tels que les toilettes et l'arrosage de jardin. En ce sens, la réutilisation potable indirecte (qui demande un traitement plus exigeant, mais ne nécessite pas de deuxième conduite) peut s'avérer intéressante.

d) Comparaisons de coûts

Tous ces facteurs de décision mentionnés précédemment – rareté, réglementation ou géographie – sont empreints de considérations de coûts parce qu'ils ont des répercussions sur l'économie des projets. En outre, il faut souligner que le coût unitaire de la régénération dépend aussi de la composition de l'eau usée en entrée, des exigences de qualité en sortie, d'autres conditions locales (coûts de l'énergie, de la main-d'oeuvre, etc.) ou enfin de la taille de l'installation et de la technologie de traitement (voir Tableau 10), tous ces paramètres rendant chaque projet très spécifique.

Selon un rapport du Conseil du Premier Ministre australien pour la Science, l'Ingénierie et l'Innovation (PMSEIC, 2003), il est difficile d'obtenir les coûts réels des projets de réutilisation d'eaux usées sur une base comparable pour l'Australie, étant donnée la fréquence des mécanismes de subventions croisées. Ce rapport opte donc pour une comparaison des coûts d'exploitation uniquement, en indiquant comme règle approximative que le coût total unitaire est au moins le double du coût d'exploitation. Les auteurs de la présente étude ont essayé d'éclairer aussi bien la question de l'investissement initial que des coûts d'opération pendant leurs visites de terrain.

Aussi bien à Sydney qu'à Adélaïde, les opérateurs n'incluent pas dans leur calcul économique du projet le coût d'infrastructures qui existaient avant que celui-ci ne soit engagé, même si ces infrastructures sont nécessaires pour obtenir une eau réutilisable. Ils étudient ainsi uniquement le coût du traitement *additionnel* nécessaire pour pouvoir réutiliser l'eau, étant donné que les autres investissements ont déjà été effectués et ne sauraient être annulés, même si le projet de réutilisation n'était pas réalisé. C'est cette exclusion des « sunk costs » qui donne l'avantage à la réutilisation par rapport au dessalement qui ne peut pas s'appuyer sur des équipements existants. En outre, ses frais d'exploitation (notamment énergétiques) sont plus importants. La stratégie de Sydney Water est donc de régénérer avant tout les effluents qui subissaient jusqu'alors déjà un traitement secondaire, voire tertiaire, afin de minimiser le traitement additionnel nécessaire (désinfection par UV uniquement après un traitement tertiaire par microfiltration, sinon dénitrification, microfiltration et désinfection) et faire jouer au mieux l'« effet sunk costs ». Sydney Water tente aussi de minimiser les coûts de pose d'un nouveau réseau en utilisant des conduites de gaz désaffectées au centre-ville de Sydney pour transporter l'eau régénérée.

A Adélaïde, c'est un calcul de « coût évité »⁷⁷ qui a été effectué pour les deux projets de Virginia et Willunga, en comparant le coût de la réutilisation au coût d'un traitement encore plus sophistiqué qui aurait permis le rejet maritime. Dans le cas de la réutilisation agricole de Virginia, l'eau est donnée gratuitement à l'opérateur de la conduite Earth Tech qui relie la STEP de Bolivar et les champs maraîchers. Cette eau étant riche en nitrate et phosphore (malgré sa qualité quasi-potable pour d'autres paramètres), elle aurait dû subir sinon d'autres traitements avant de pouvoir être rejetée en mer. Selon les dirigeants de SA Water, de nouvelles normes pourraient bientôt exiger un nouvel investissement de 100M AUD pour pouvoir continuer à décharger une partie de l'effluent en mer (comme le permet la licence actuelle), à comparer à un investissement de 50M AUD pour construire une autre conduite d'environ 20km permettant de réutiliser l'intégralité de l'eau traitée.

Dans le cas d'une autre STEP à Adélaïde, un projet de réutilisation doit produire 2,5M m³/an pour l'irrigation urbaine. Or, la salinité de l'eau rend nécessaire un traitement par osmose

⁷⁷ « avoided cost » en Anglais

inverse, estimé à 60M AUD. Encore une fois, cet investissement est moins important que la somme des coûts pour les traitements qui auraient été nécessaires en cas de rejet (pour des raisons réglementaires) ainsi que pour l'augmentation de la ressource en eau locale correspondante. Ce dernier coût a pu être calculé à partir des prix des licences pour le prélèvement de l'eau dans la rivière Murray.

L'économie des projets de réutilisation est donc largement basée sur les « coûts enterrés » ainsi que les « coûts évités ». Ceci corrobore la remarque de John Radcliffe au sujet du coût de l'eau régénérée à Sydney : si le traitement des STEP était de plus grande qualité, l'eau régénérée serait moins chère, parce qu'une plus grande partie du coût du traitement serait imputé aux pollueurs (par le tarif d'épuration).

Ce constat est confirmé et décliné par l'économiste de Gold Coast Water (GCW), Andrew Fowley. Le coût des projets (pour la plupart industriels ou commerciaux) de réutilisation de GCW dépend en effet du « driver » pour l'investissement. Théoriquement, si la réutilisation est la solution à moindre coût pour être conforme avec certaines normes environnementales, alors l'opérateur devrait en fait payer la personne qui utilise l'effluent. Si par contre, le projet est déterminé par la demande du client, alors c'est lui qui doit payer⁷⁸. A titre d'exemple, Fowley cite le projet de réutilisation d'eaux usées (régénération par osmose inverse) de la raffinerie BP à Brisbane. Celle-ci avait le choix entre utiliser de l'eau potable qui pouvait faire trois cycles dans les tours de refroidissement, et payer plus pour de l'eau ultra-pure qui peut faire 5 à 6 cycles, ce qui évite la construction d'une nouvelle conduite d'eau potable. Le principal avantage de la réutilisation par rapport à l'eau potable est donc bien de repousser des investissements que rendrait nécessaire une plus grande demande en eau potable.

En Espagne, il convient, de la même manière qu'un opérateur peut raisonner en « coût évité » lorsqu'un projet de réutilisation lui permet de différer ou d'annuler un autre projet plus coûteux, de comparer aussi le coût marginal d'une autre source de production d'eau évité par l'introduction d'un projet de réutilisation. A Barcelone par exemple⁷⁹, le projet de réutilisation coûte (pour le traitement) un peu plus de 0.1€/ m³, alors que l'usine de dessalement « concurrente », qui consomme près de 4kW.h/ m³, présente un coût complet estimé de l'ordre de 0,8-1€/ m³. On économise donc ce coût marginal de production (0.7 à 0.9€/m³) à préférer l'eau régénérée.

Dans le cas de l'eau de pluie, les calculs doivent être encore plus inventifs, notamment à cause de la question de la propriété de l'eau. Si l'on considère que cette eau appartient à l'Etat (« the crown » en Australie), alors chaque ménage avec un réservoir d'eau de pluie devra avoir une licence. SA Water a fait une analyse comparant le coût par m³ pour un système avec double réseau et un système avec réservoir d'eau de pluie pour la réutilisation résidentielle. Le second s'est avéré beaucoup plus cher: Avec 3.000 AUD d'investissement pour un réservoir de 5.000L (15 ans d'espérance de vie) qui dépend beaucoup de la pluviométrie, le coût par m³ est beaucoup plus élevé dans le cas d'Adélaïde (sans même compter le coût supplémentaire d'une hypothétique licence). Pour 200m², il ne sera en effet pas possible de collecter plus de 73.000L par an, avec les précipitations moyennes. A Sydney par contre, avec 105.000l/an, le calcul peut donner un résultat différent.

Au Mexique, l'on peut citer l'exemple de la municipalité de la station balnéaire Los Cabos (Basse Californie) qui a convaincu les hôteliers à financer une station d'épuration qui traitera

⁷⁸ Se référer en complément à la législation IPART régulant l'établissement du prix pour l'eau recyclée en partie III.

⁷⁹ Source : entretien avec Rafael Mujeriego

aussi les effluents urbains. Cette solution est intéressante pour le secteur hôtelier, parce que la CNA tarifie ses droits sur l'eau à environ 20 à 30 pesos/m³ pour cette activité, tandis que la réutilisation peut permettre une production d'eau à environ 5 pesos/m³ (avec amortissement de l'investissement sur 20 ans), selon la CNA.

L'argument des coûts peut s'illustrer aussi à partir de différents projets à San Luis Potosí. Un développement privé d'un terrain de golf avec environ 1.000 habitations autour a entièrement financé un système de traitement et de conduites (sur plus de 7km) pour de l'eau prélevée sur le réseau d'égouts de la ville. L'investissement pour la STEP seule (boues activées et chloration, 80L/sec) est de 50M de pesos, les coûts d'exploitation selon les informations du développeurs d'environ 7-8 pesos/m³. Mais cela reviendrait 25-30% moins cher que l'approvisionnement en eau potable par la CNA.

En effet, si des industriels de la ville pompent dans l'aquifère à 200m de profondeur, ils doivent payer la CNA 16,5 pesos/m³ (« zone de disponibilité 1 ») en sus du coût de pompage que l'on peut estimer à approximativement 16 pesos/m³, soit un total de plus de 32 pesos/m³. Par rapport à cela, un projet envisage la construction d'une conduite partant de l'une des STEP pour alimenter de nouveaux industriels. Celle-ci coûterait 40M de pesos pour 5km de réseau primaire, 21 km de réseau secondaire et 3 km de réseau tertiaire. Selon Alberto Rojas Ramírez de la Comisión Estatal del Agua, le projet qui devrait payer l'eau retraitée à 10 pesos/m³ pourrait recouvrir ses coûts d'investissement en huit mois. Les propres calculs des auteurs donnent même des résultats encore plus optimistes (environ 4 mois), à condition d'inclure l'économie des coûts de pompage.

e) Subventions où pourquoi tout projet de réutilisation est combinaison d'économie et de politique

Reste que aujourd'hui, il n'y aurait, selon les interlocuteurs que le binôme a rencontrés, qu'un ou deux projets de réutilisation parfaitement rentables en Australie. Le seul projet n'ayant bénéficié d'aucun soutien par des subventions et s'avérant rentable aujourd'hui est le projet d'irrigation de Virginia opéré par Earth Tech. Fowley mentionne un autre projet industriel vendant l'eau à 75-78 cents/m³, mais uniquement parce qu'il y a eu une subvention publique de 30 à 40% du montant de l'investissement. L'économie des projets a donc été soutenue, en Australie comme au Mexique, par un effort de subventions de la part des pouvoirs publics.

Les projets australiens peuvent bénéficier de différentes subventions du Australian Government Water Fund, d'un volume total de 2MM AUD, dont les plus importants sont gérés par la National Water Commission.

D'un côté, le "Water Smart Australia Programme" (1,6MM AUD) subventionne des projets d'infrastructure à partir d'1M AUD. Le plus grand projet soutenu par le Water Fund est le Western Corridor Project au Queensland, lequel recevra 408M AUD.

"Raising National Water Standards" (200M AUD) vise à développer des technologies, à tester des nouveaux systèmes et à financer des recherches alimentant le débat public, comme par exemple sur la tarification de l'eau réutilisée.

L'objectif est d'aider des projets innovants, à condition que l'Etat concerné apporte conjointement des fonds aussi. La subvention du fonds varie entre 20 et 50% du volume total des projets. A ce jour, deux appels à projet ont été faits, chacun ayant donné lieu à 180-190 propositions, dont 30-40 ont été sélectionnées par la Commission nationale.

Enfin, le Plan National de Sauvegarde de l'Eau, annoncé en début d'année, a été récemment validé par le Gouvernement du Commonwealth (le 24 juillet 2007) : doté d'une enveloppe de

10 MM AUD sur 10 ans, il vise à assurer une utilisation durable de l'eau en milieu rural. Il assurera une meilleure gestion de l'eau avec une attention accrue au niveau du bassin Murray-Darling, malgré le fait que l'Etat du Victoria, esseulé, n'ait pas accepté les termes de l'arrangement.

Mais d'autres fonds existent au niveau des Etats fédérés. Le gouvernement du New South Wales a par exemple mis en place un Water Savings Fund doté de 120M AUD sur 5 ans. Il doit subvenir au besoin de projets d'économie d'eau qui ne recouvrent pas entièrement leurs coûts par les tarifs. 55M AUD ont déjà été alloués au cours des 30 derniers mois.

En guise d'exemple, le projet de recharge de nappe proche de l'aérodrome de Parafield qui alimente Mawson Lakes (Adélaïde) avec de l'eau de pluie, a entièrement bénéficié de fonds publics – mais pas des fonds du Water Fund qui n'a été mis en place qu'après coup (AATSE, 2004). Pour financer la construction des trois bassins (4,5M AUD, Photo 11), les contributions suivantes ont été faites :

- 1.38 M AUD: Commonwealth's Environment Australia Urban Storm Water Initiative
- 1 M AUD: GH Michell&sons (entreprise locale)
- 140,000 AUD: Northern Adelaide Plains Barossa Catchment Water Management Board
- 40,000 AUD: contribution en nature du South Australian Department of Water Resources
- Le reste a été financé par la ville de Salisbury.

Photo 11 : Vue aérienne du site des trois bassins pour le projet de recharge de nappa à Adélaïde



Le calcul du prix de vente de cette eau de pluie se fait donc uniquement sur la base des coûts d'exploitation qui sont ensuite comparés au prix de l'eau potable (avec les limites que cela appelle), soit 1,16 AUD/m³. Selon John Ringham de SA Water, personne n'a jusqu'ici fait un calcul entièrement honnête sur les projets de recharge de nappe. Le coût du foncier pour la construction des bassins de rétention qui sont nécessaires pour le stockage de l'eau de pluie n'est généralement pas inclus.

De la même manière, en Espagne, certains projets sont aussi largement subventionnés par des bourses de l'Union Européenne. Le projet de Barcelone par exemple, d'un montant global de 102M€, bénéficie de 85% de subventions du fonds européen de cohésion.

L'« économie » des projets n'est donc jamais une pure question de calcul, mais inclut presque toujours une combinaison d'économie et de politique.

Ainsi, le Premier Ministre Howard s'était engagé avant les dernières élections en 2004 à donner par exemple 200M AUD à l'Australie du Sud au nom de la National Water Initiative. Des engagements ont donc été pris il y a bien longtemps pour certains projets qu'étudie la Commission Nationale, alors que leur justification est très faible d'un point de vue économique.

En outre, la question du partage de la charge pour subventionner les différents projets est très politique aussi. Le gouvernement du Commonwealth est sollicité pour subventionner tous les projets de réutilisation. Or, celui-ci est mené par une majorité libérale, alors que la plupart des Etats sont dirigé par des socialistes, ce qui crée souvent des tensions autour de la question qui paie combien, et pour quoi.

Enfin, le référendum sur la réutilisation potable mené à Toowomba dans le Queensland n'a pas vraiment reflété une opposition de la population contre cette solution, mais plutôt des dissensions entre l'ancien maire supporter du projet et le nouveau maire qui s'y est opposé.

La question qui peut alors se poser est celle de la nécessité des subventions pour une nouvelle technologie comme la réutilisation. Devront-elles être maintenues ? Ne risquent-elles pas de devenir des barrières au développement d'autres ressources moins subventionnées ? John Ringham de SA Water, avoue que les solutions de réutilisation sont choisies parce qu'elles correspondent au critère d'innovation de la National Water Commission, alors que, dans le cas d'Adélaïde, il serait possible de produire de l'eau moins chère avec une technologie de dessalement, qui cependant n'est pas considéré comme innovante. De même, John Bursill dénonce le projet bancal de réutilisation potable qui avait été proposé au référendum de Toowomba, alors qu'un projet moins innovant de réutilisation agricole aurait non seulement fait plus de sens, mais aussi emporté l'adhésion de la population. On constate enfin que le cercle intégré de l'eau n'est pas nécessairement reproduit dans l'organisation des hommes qui peuplent un territoire, si bien qu'une solution optimale pour un territoire intégré n'est pas toujours évidente pour des administrations qui ne se parlent pas. Dans le cas des villes de Vitoria et de Bilbao en Espagne, il est établi⁸⁰ qu'un mètre cube rejeté dans le barrage surplombant les deux villes rapporte plus en produisant de l'électricité (Bilbao) qu'il ne coûte à être substitué par de l'eau régénérée (Vitoria). Mais la subvention croisée est difficile à mettre en œuvre entre deux villes qui ne répondent pas à une unique hiérarchie.

Dans ce cas, il faudrait plutôt autoriser la possibilité des subventions croisées entre ressources, le prix de l'eau ou de l'assainissement permettant de subventionner le développement d'une nouvelle ressource comme l'eau régénérée. Andrew Fowley de GCW argumente que les subventions croisées peuvent être justifiées économiquement, car en augmentant le prix de l'eau potable pour soutenir des projets d'eau régénérée, on augmente en fait la sécurité d'approvisionnement de la ressource potable. Bob Hayward de Sydney Water prévoit cette possibilité et a calculé que l'inclusion de certains projets de réutilisation dans le tarif de l'eau potable ferait monter celui-ci de 1,26 à 1,32 AUD/m³. Ceci mettrait fin aussi à la diversité des prix de l'eau réutilisée qui varient même parfois au sein d'un même projet, pour différents usages.

⁸⁰ Source : entretien avec Rafael Mujeriego

L'on a pu démontrer un « effet de rebond » pour les prix de l'eau. Si la consommation baisse après une augmentation du prix, elle rebondit néanmoins après un certain temps, même si elle n'atteint généralement plus le niveau antérieur. Il faut cependant distinguer les clients résidentiels dont la demande est peu élastique au prix des clients industriels qui sont très sensibles au prix. Pour preuve du consentement à payer pour l'eau régénérée de certains ménages, Andrew Fowley mentionne les ménages (certes riches) sur la côte de Sydney qui sont prêts à investir des milliers de dollars australiens dans leur station de dessalement privée afin de pouvoir arroser leur jardin même par temps de restriction. GCW en tout cas prévoit de passer le prix de l'eau de 1 à 3 AUD/m³ d'ici trois ans.

f) Volonté « écologique »

Un projet de réutilisation peut enfin émerger de la simple volonté de répondre à des objectifs intuitifs de développement durable, ou à la pression d'associations promouvant cette vision. Dans le cas de la Communauté Urbaine d'Arras par exemple⁸¹, ces deux phénomènes ont amené l'agglomération à opter pour la réutilisation d'eaux (pluviales).

D'une part en effet, des associations se sont plaintes de ne pas voir la communauté urbaine d'Arras mieux gérer sa ressource locale d'eau avant de la prélever à l'extérieur de son périmètre propre, et de ne pas répondre plus efficacement à la demande en eau en fonction de ses usages (c'est-à-dire, différencier les qualités requises).

D'autre part, les élus souhaitent répondre à la volonté ressentie chez leurs concitoyens d'effectuer un « développement durable » (qui ne nécessiterait pas même de justification économique), et de protéger leur communauté d'un futur incertain.

Ce désir de durabilité s'exprime d'après les interlocuteurs du binôme de manière beaucoup plus poussée en Allemagne. Ce pays connaît des conditions économiques semblables, mais aussi un mouvement écologiste plus fort et mieux structuré que celui en France qui a marqué les esprits et renforcé la « conscience verte » de la population. Ainsi, on y a observé l'émergence de beaucoup plus de projets de réutilisation. La volonté « écologique » semble donc être aussi liée à la culture et l'histoire écologique du pays en question.

⁸¹ Source : entretien avec MM. Avronsart et Lechantoux

5. Gestion du risque

Elément crucial dans tous les projets, la gestion du risque prend une place croissante dans le développement de la réutilisation en Australie, du fait du nombre important d'acteurs dans les projets et des risques potentiels, notamment sanitaires, qui y sont rattachés.

a) Analyse des risques

La gestion du risque réalise tout d'abord une analyse objective et la plus détaillée possible des risques des projets. Barbara Richardson du Department of Environment and Climate Change de New South Wales souligne que de nombreux projets soumis à l'évaluation pour financement ne sont pas assez centrés sur les objectifs. Or la démarche doit toujours répondre aux quatre questions suivantes :

1. Quel est le but du projet?
2. Comment le projet va-t-il permettre de l'atteindre ?
3. Combien cela va-t-il coûter ?
4. Quels sont les risques ?

Pour répondre à la dernière question, toutes les éventualités doivent être étudiées de manière sérieuse et crédible. Cela concerne les risques d'approvisionnement, les risques environnementaux et sanitaires et le risque de marché qui est majeur pour des marchés largement nouveaux comme ceux de la réutilisation.

Enfin, le « dégroupage »⁸² du marché de l'eau en Australie, i.e. la séparation patrimoniale entre le gestionnaire du réseau et les propriétaires de certaines infrastructures de réseau (p.ex. des stations de traitement pour réutilisation) peut créer des risques financiers supplémentaires comme le souligne un rapport de la Queensland Water Commission (QWC, 2007a, 2007b). En effet, si le gestionnaire du réseau achète des services et revend de l'eau qui lui a été fournie par un opérateur privé, le premier, et finalement son actionnaire l'Etat, s'expose à des risques financiers importants. En effet, des pertes considérables peuvent être réalisées si l'opérateur privé s'arrête de fournir le gestionnaire du réseau en eau régénérée, alors que celui a un engagement contractuel d'approvisionnement vis-à-vis d'un client tiers.

b) Partage des risques

C'est pour cette raison qu'un partage approprié du risque doit avoir lieu entre les acteurs qui sont le mieux capables de le maîtriser. Un bon exemple de partage de risque a eu lieu dans le projet Camellia à Sydney. Un opérateur privé doit prélever des effluents traités d'une canalisation pour traitement (MF, OI), puis les revendre à des utilisateurs industriels. Sydney Water va pour cela signer un contrat « Take-or-Pay », i.e. la société garantit de racheter à l'opérateur un volume équivalent à la demande consolidée des 10 plus grands consommateurs industriels, quelle que soit la demande réelle de la part de ces usagers. Cela représente un volume de 600.000 m³ par an, sur un volume potentiel total de 2,2M m³. L'opérateur privé prend le risque de la revente de la différence à des consommateurs (industriels et agricoles) plus petits.

⁸² « unbundling » en anglais

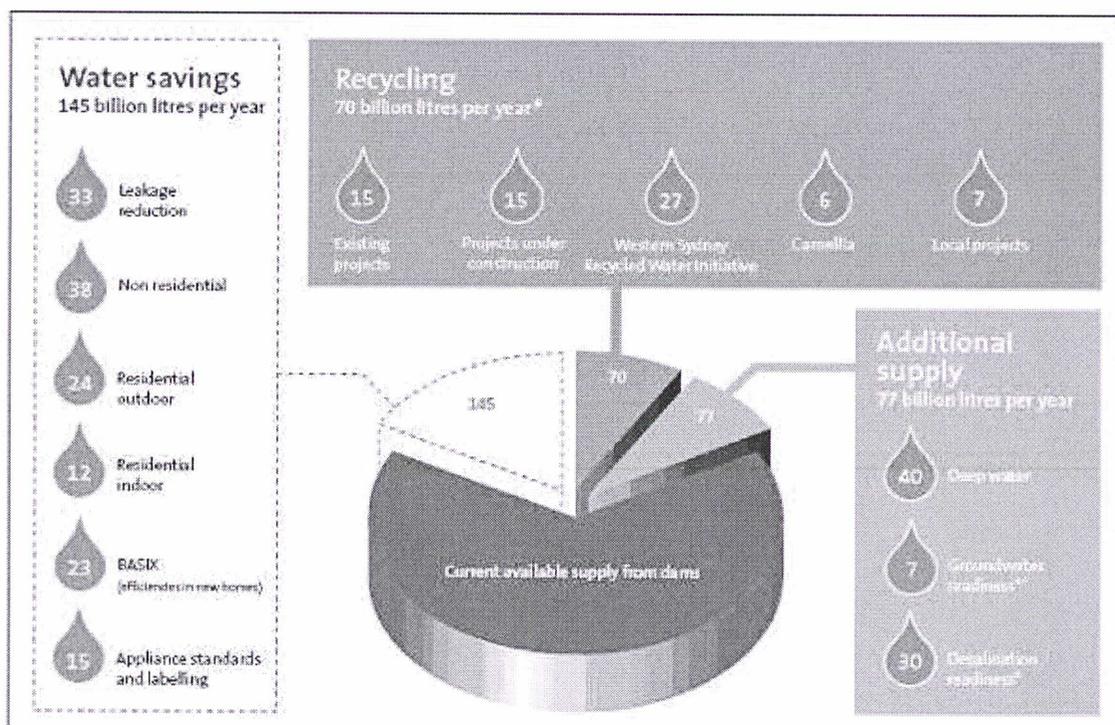
Dans le Queensland, Véolia vend l'eau régénérée à l'Etat (le « grid manager » ou gestionnaire du maillage) qui prend le risque financier.

c) Portefeuille de ressources

Concernant le risque d'approvisionnement, les villes australiennes envisagent dans leur stratégie de s'équiper d'un portefeuille de ressources afin de limiter le risque de dépendance trop marquée d'une seule ressource.

Graphique 5 : Le « mix » de mesures d'offre et de demande pour assurer l'approvisionnement en eau de Sydney d'ici 2015 :

Meeting Sydney's water needs in 2015

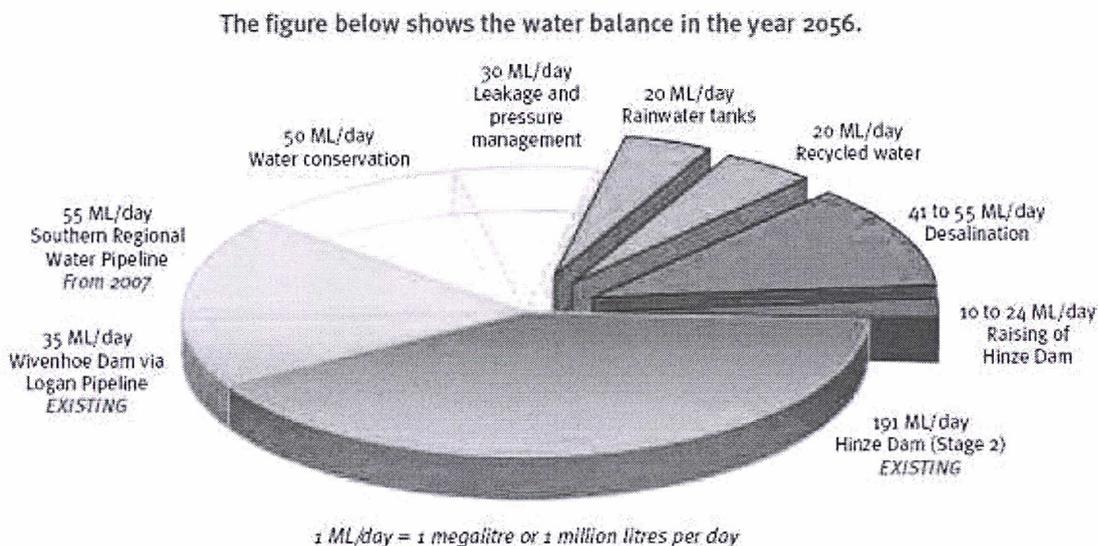


Sydney prévoit une demande annuelle en eau d'environ 543M m³ d'ici 2015. Le plan de l'eau de la métropole (NSWG, 2006) prévoit une offre à hauteur de 575M m³. Cette offre restera majoritairement assurée par le système de 11 barrages avec une capacité théorique totale de 2,6MM m³. Pour autant, le plan envisage aussi d'élargir son portefeuille de ressources de 147M m³ et de réduire sa demande par des mesures d'économie d'eau à hauteur de 145M m³. L'augmentation des ressources se fera principalement par des projets de réutilisation (70M m³), ensuite par l'accès à des sources d'eau profondes (40M m³) et enfin par des investissements dans des capacités de dessalement et de pompage de nappes phréatiques comme source d'appoint en cas de sécheresse extrême. Les projections d'économie s'appuient principalement sur l'élimination de fuites dans le réseau et sur des réductions de consommation publique (Graphique 5).

Gold Coast City a procédé à un exercice similaire de prévision de sa demande et de son offre futures (GCC, 2006). Les besoins pour l'année 2056 sont estimés à environ 466.000 m³ par

jour, soit environ 170M m³ par an. Pour répondre à cette demande, la ville prévoit environ 280.000 m³ par jour en provenance de ses deux barrages (barrages Hinze et Wivenhoe, par les conduites de Logan et Southern Regional), soit environ 60% de la demande totale. Environ 100.000-120.000 m³ (21-25%) seront disponibles grâce à de nouveaux projets, dont le dessalement, la réutilisation et la récupération des eaux de pluie. Les 80.000 m³ restants (17%) doivent être assurés par des mesures d'économie d'eau (Graphique 6, Tableau 6). Ainsi, la réutilisation s'insère à chaque fois dans un ensemble de mesures assurant la sécurité d'approvisionnement et limitant les risques spécifiques aux différentes sources.

Graphique 6



Note: Recent changes in dam safety requirements have meant final water supply contributions from Hinze Dam are undergoing investigation. This may alter both the raising of Hinze Dam yield and desalination capacity by approximately 14 ML/day.

Tableau 6

Projets		10 ³ m ³ /jour
Sources existantes	Barrages Hinze et Little Nerang	191
	Barrage Wivenhoe par le pipeline Logan	35
Nouveaux projets	Dessalement	41-55
	Gestion des fuites et de la pression	30
	Réservoirs d'eau pluviale	20
	Augmentation du niveau du barrage Hinze	10-24
	Eau réutilisée	20
	Pipeline de Southern Regional Water	55
	Economie d'eau	50
Projets nouveaux et locaux	Eaux grises	Utilisation locale
	Nappes phréatiques	Utilisation
	Réutilisation potable indirecte	En cours d'étude
	Récupération des eaux pluviales	Utilisation locale
Besoins totaux en 2056		466

d) Evaluation des risques financiers

Afin de gérer au mieux les risques potentiels des projets de réutilisation, Andrew Fowley de GCW a développé un modèle financier sur 50 ans pour évaluer les effets économiques des investissements de GCW. Le prochain objectif est de procéder à des **simulations Monte Carlo** et à l'analyse d'options réelles (Real Options Analysis), comme étudié dans un projet de recherche en cours de la WSAA.

Prenons l'exemple d'un traitement de microfiltration/osmose inverse sur 20 ans. L'investissement initial sera de 20M AUD. Les coûts d'exploitation sur 20 ans peuvent être décomposés en partie fixe et en partie variable, laquelle est déterminée avant tout par la demande d'eau. Supposons qu'après 7 ans par exemple, il faille remplacer 100% des membranes. Ces hypothèses permettent de calculer une valeur actualisée nette (VAN) du projet. Or, en réalité, le remplacement des membranes se fera successivement, en fonction de leur espérance de vie. Le renouvellement des membranes doit donc être repartitionné dans le temps selon la formule générique suivante : Durée de vie = f(volume, qualité).

Il est maintenant possible de faire varier le volume qui suit une distribution normale, avec une moyenne μ et une déviation standard σ . Avec un générateur de variables aléatoires, on peut calculer l'intervalle $[-1, +1] \sigma$. On obtient une courbe de VAN normalement distribuées. On peut ainsi s'assurer par exemple que 98% des scénarios de volume donnent une VAN positive. L'analyse technique des scénarios permet ensuite d'éliminer ceux avec la plus faible probabilité, afin d'augmenter la fiabilité de l'instrument. Fowley souligne la valeur communicative de ce résultat chiffré pour des décideurs politiques.

6. Exemples de coûts de projets

Dans cette partie, nous analysons plus en détail chacun des projets de réutilisation étudiés lors de nos visites de terrain et avec nos différents interlocuteurs. Nous sommes conscients que cela peut avoir un effet répétitif par rapport aux réflexions générales de la partie IV.1 et à la discussion des facteurs déterminants en IV.4, ainsi qu'avec la description individuelle des projets au début de ce mémoire. Néanmoins, cette analyse détaillée doit permettre au lecteur de comprendre sur des exemples concrets comment les spécificités locales et les arbitrages économiques et politiques façonnent les projets de réutilisation. Le lecteur ne recherchant pas ce degré de précision pourra se reporter directement au chapitre V.

a) Rouse Hill

Rouse Hill a été le premier projet de réutilisation résidentielle avec un double réseau à Sydney. Son objectif était de réduire la consommation d'eau potable de 30-40% en la remplaçant par de l'eau régénérée. Selon Geoff Roberts du bureau d'ingénieur Manidis Roberts, il coûte environ 1,15 AUD/m³ pour fournir de l'eau potable (CAPEX du réseau simple et OPEX inclus)⁸³. Le coût pour l'eau régénérée est d'environ 50% supérieur : 1,50-1,60 AUD/m³ (CAPEX double réseau et OPEX inclus de la même manière). Notons cependant que les premiers chantiers ont souffert d'un manque d'optimisation technique. Selon John Radcliffe, les conduites d'eau potable ont été posées d'un côté de la rue, les conduites d'eau régénérée de l'autre...

Mais le problème majeur du problème a été son surdimensionnement. Il était apparemment initialement prévu pour 220.000 ménages (selon Geoff Roberts). Or, seulement 16.500 ménages sont aujourd'hui desservis en eau régénérée (selon Sydney Water), avec une extension en cours à 18.000 logements supplémentaires. Pendant plusieurs années, le réseau d'eau régénérée a donc dû être alimenté avec de l'eau potable, parce que le volume d'effluents produits par les ménages installés était insuffisant. Le rapport entre eau potable et eau régénérée a même été de 80:20 dans les premiers mois du projet, alors que les gens payaient cette eau mélangée au prix de l'eau régénérée, soit 0,28 cents/m³. En outre, étant donné les volumes très faibles dans cette phase initiale (il n'y avait alors que 3.000 logements occupés seulement), le coût de production de l'eau régénérée aurait grimpé jusqu'à 7 AUD/m³ ! Le rapport du conseil scientifique du Premier Ministre mentionne en tout cas un coût complet de 4 AUD/m³ (CAPEX et OPEX). Il note aussi un effet pervers du prix trop bas de l'eau régénérée : la consommation totale (eau potable et régénérée) des maisons équipées en double réseau dépasse celle de ménages comparables avec seulement une alimentation en eau potable.

D'après Roberts, dans le cas de grandes stations d'épuration (comme celle construite à Rouse Hill), la rentabilité du prix dépend plus de la localisation de la station par rapport aux habitations (coût du réseau et de pompage en cas de dénivelé) que du traitement effectué. Si Rouse Hill était à refaire, Roberts recommanderait donc de construire plusieurs STEP bien placées pour arriver à des solutions locales moins coûteuses. C'est d'ailleurs ce qui est prévu pour le Western Sydney Recycled Water Initiative, qui devra desservir de nouveaux quartiers pour un total de 160.000 logements⁸⁴.

⁸³ Les OPEX (« operational expenses ») représentent les coûts de fonctionnement et les CAPEX (« capital expenses ») les investissements en capital.

⁸⁴ Source: <http://www.sydneywater.com.au/SavingWater/RecyclingandReuse/>

Selon des données non publiées (CIE Consultants, 2007) obtenues par John Radcliffe, l'objectif est néanmoins d'augmenter le prix sensiblement sur les deux prochaines années. Ainsi, le prix du m³ augmenterait de 0,3 AUD à 1,11 AUD en deux ans, ce qui correspond à une hausse de 270%. Pour autant, le prix resterait d'environ 10% inférieur à celui de l'eau potable (Tableau 7). Ainsi, les prix de Rouse Hill rejoindraient ceux de Sydney Olympic Park.

Tableau 7

Année financière	2006/07	2007/08	2008/09
Tarification volumique (\$/m ³)	0.30	0.71	1.11
Tarification fixe (\$/an)	26.03	18,69	10.59
Prix volumique de l' eau régénérée compare à celui de l'eau potable (%)	24%	55%	89%

b) Sydney Olympic Park

Le projet du parc olympique de Sydney remonte à 1993 et constitue l'un des premiers projets de gestion intégrée du cycle d'eau, avec l'utilisation d'eau régénérée pour les toilettes et l'irrigation d'espaces publics (parcs, puis terrains de sports, fontaines, lacs).

L'investissement initial de 30M AUD a été financé par les fonds des Jeux Olympiques. L'investissement inclut les travaux importants pour la STEP et la récupération des eaux de pluie (dans différents bassins, dépollution des sols incluse) ainsi que les conduites pour un site d'environ 4km de longueur et de 2km de largeur. Listowski avoue que de nombreux coûts n'ont pas été clairement identifiés (comptabilisation des coûts de pose avec les coûts de construction des routes) et que le coût global du projet a probablement été gonflé, étant donné l'afflux de fonds à l'époque des Jeux.

Selon les informations que les auteurs ont pu obtenir lors de leur entretien avec Andrew Listowski de Sydney Olympic Parc Authority, une partie de l'eau régénérée est aujourd'hui vendue au quartier de Newington (équipé du double réseau) pour 1,11 AUD, soit 15 cents en deçà du prix de l'eau potable. Le coût du traitement de l'eau régénérée est d'environ 2 AUD/m³ et correspond au prix que paie l'autorité du site à l'opérateur exploitant la STEP. Il couvre donc les frais de main-d'oeuvre, d'électricité, de substances chimiques et de maintenance, mais comporte aussi la marge commerciale de l'opérateur (contrat de 25 ans), avec des coûts d'opération basés sur un certain volume de traitement et des paiements semestriels. Ce coût, bien qu'encore élevé, reflète bien la baisse des coûts due à l'apprentissage qui a eu lieu entre les premiers projets comme celui de Rouse Hill et des projets plus récents comme celui-ci.

La différence avec le coût de production (OPEX uniquement) et le prix de vente est financé par l'Etat du New South Wales.

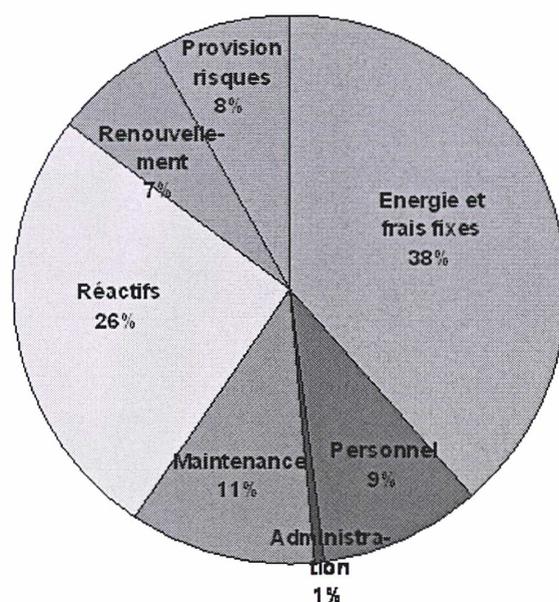
Cependant, il faut noter que le projet a des externalités positives majeures qui ne sont pas quantifiées ici. Il permet d'économiser 850.000 m³ d'eau potable par an, ne donne lieu à aucune décharge d'effluent dans la mer et permet le contrôle et l'utilisation optimisée de tous les eaux de surface récupérées sur le site (ATSEE, 2004).

c) Western Corridor

Le projet du Western Corridor dans le South-East Queensland prévoit la construction d'une canalisation amenant de l'eau de six STEP dans la région de Brisbane vers trois stations de

traitement avancé (STA) à des fins de réutilisation industrielle (centrales électriques, 100.000 m³/jour), potable indirecte (via un barrage, 110.000 m³/jour) et agricole (faible volume). Selon les informations du directeur du projet (remporté par Veolia), Jean-Michel Seillier, l'investissement total du projet s'élève à 1,7MM AUD pour les trois STA, les canalisations entre les STEP et les STA et la conduite transportant l'eau régénérée vers le barrage. Cette dernière aura une longueur d'environ 200km et représente plus de 50% des coûts du projet, soit environ 1MM AUD. Les estimations de coûts d'exploitation annuels pour une production moyenne de 170.000 m³/jour pour les trois stations sont d'un peu moins de 70M AUD. Elles se répartissent de la manière suivante :

Graphique 7



Ceci revient à un coût par m³ d'à peine plus d'1 AUD pour le traitement uniquement. A cela, il faut rajouter les coûts d'amortissement et d'opération des conduites (notamment pompage). Selon les informations des représentants du gouvernement du Queensland, le coût complet par m³ reviendrait ainsi à 3 AUD, ce qui est comparable au coût du dessalement. Pour comparaison, l'eau potable ne coûte qu'environ 60 cents/m³. L'opinion publique cependant est plus favorable à l'idée de la réutilisation qu'à celle du dessalement, car elle adhère plus au concept général de développement durable.

d) Mawson Lakes

Le projet de Mawson Lakes à Adélaïde concerne la réutilisation domestique non potable (double réseau) et municipale (arrosage public, lacs, jeux d'eau). John Ringham de SA Water a expliqué au binôme qu'il était initialement prévu de construire une station de traitement décentralisé proche du quartier de Mawson Lakes. Mais ceci aurait pris une surface importante de terrain (étant données les distances de sécurité nécessaires entre les maisons et la STEP) équivalente à 45 lots et aurait donc entraîné un coût de 4,5M AUD.

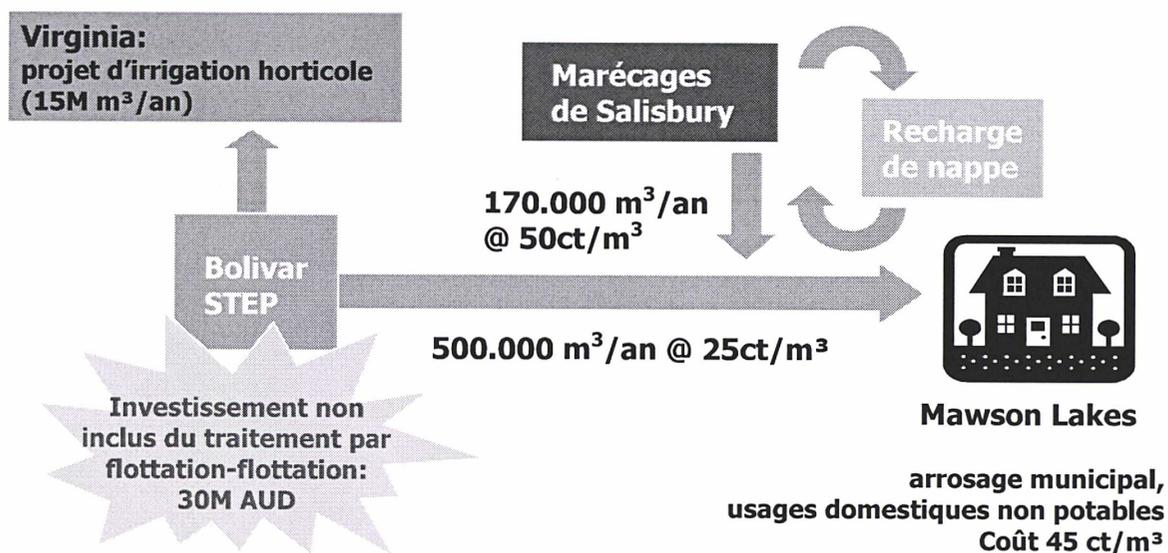
C'est pour cela qu'une canalisation (8,7km) a été construite à partir de la STEP de Bolivar opérée par United Water (groupe Véolia). Mais la station de flottation-filtration aérée (DAF-F), qui permet d'atteindre le niveau de qualité nécessaire pour la réutilisation, existait déjà

avant le projet pour irriguer des champs horticoles. L'eau régénérée est transportée dans une canalisation d'environ 100 km à Virginia et vendue aux agriculteurs. La canalisation est opérée par Earth Tech, une société du groupe TYCO. Selon les informations de l'opérateur de Bolivar, Craig Heidenreich, le coût de pompage serait de 12 cents/m³.

SA Water a calculé son projet de réutilisation à Mawson Lakes uniquement en fonction des coûts additionnels occasionnés, ce qui était une condition de sa rentabilité. Le coût d'investissement de la DAF-F à hauteur de 30M AUD n'a donc pas été pris en compte. Le calcul du coût de l'eau régénérée couvre seulement la canalisation, la station de pompage et une partie des coûts d'exploitation et de maintenance. La somme de ces coûts est de 25 cents/m³ selon SA Water, tandis que l'opérateur de Bolivar nous indique un coût d'exploitation pour la DAF-F (sans pompage) de 20 cents/m³.

L'eau qui arrive à Mawson est composée à 25% d'eau de pluie achetée à la municipalité pour 50 cents/m³. Les 75% restants sont l'eau régénérée de la STEP à 25 cents/m³. Le coût pondéré est donc d'environ 31 cents/m³. A cela s'ajoutent des coûts de contrôle et d'audit réguliers du double réseau et des connexions dans les résidences. SA Water les a estimés à 100.000-120.000 AUD/an pour l'ensemble des 10.000 foyers, soit environ 15-19 cents/m³ pour une consommation annuelle totale de 670.000 m³. Le coût total (OPEX) de l'eau régénérée serait donc d'environ 46-49 cents/m³. Notons cependant que l'opérateur de Bolivar mentionne un coût de 58 cents/m³. Le graphique ci-dessous résume le montage du projet :

Graphique 8

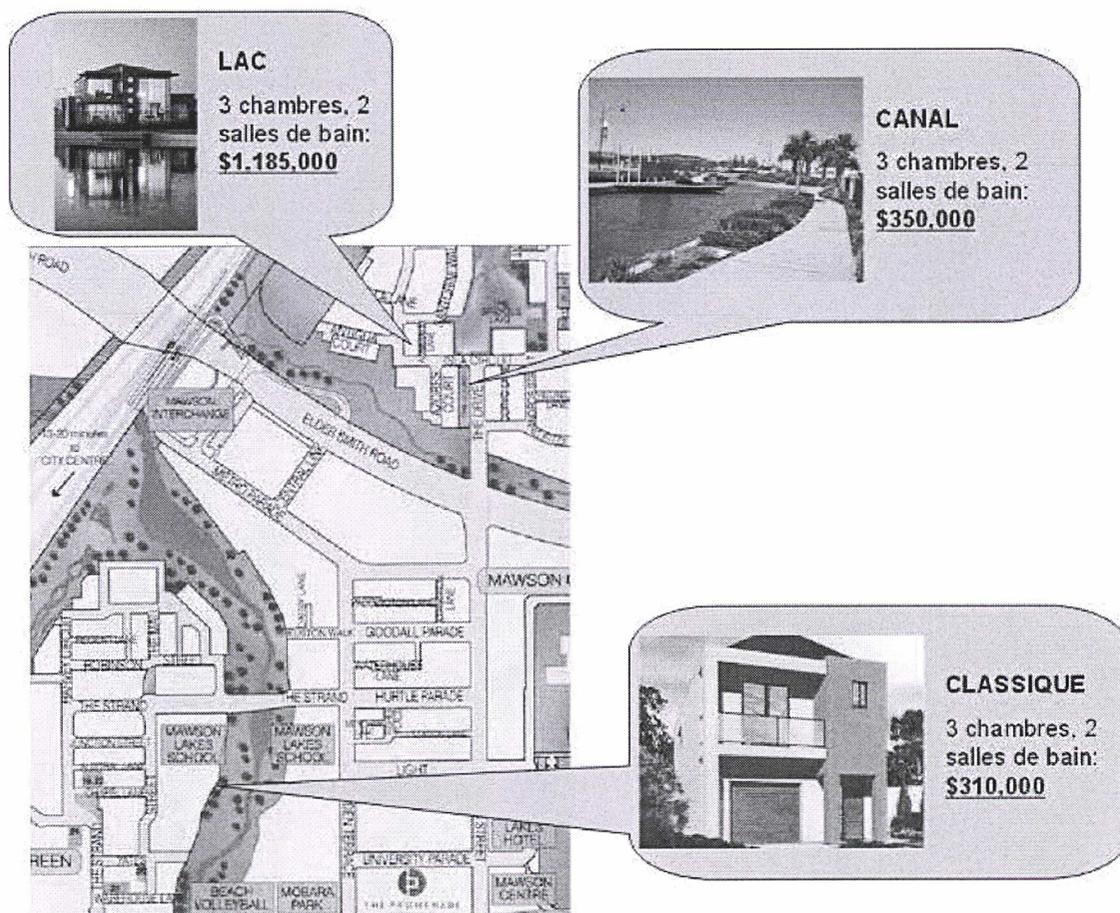


Le prix de vente de l'eau régénérée à Mawson Lakes est de 87 cents/m³. Cela représente une marge brute de 43% (22% seulement, si le coût de 58 cents/m³ est juste). Notons que le prix de l'eau potable se décompose en un abonnement annuel de 150 AUD, puis un tarif variable de 49 cents/m³ pour les premiers 125 m³ de consommation annuelle et de 1,16 AUD/m³ pour les volumes en excès de ce seuil. En incluant la partie fixe du prix de l'eau, une consommation de 125m³ par an donne un prix de l'eau potable de 1,69 AUD/m³, ce qui représente quasiment le double du prix de l'eau régénérée. Néanmoins, le seul prix de la partie variable peut être trompeur pour les ménages.

Le coût de la troisième canalisation (pour l'eau régénérée) s'élève à 2.000 AUD par foyer, mais a été inclus dans le prix des maisons. S'il est théoriquement possible de réduire le diamètre des conduites d'eau potable dans un système à double réseau (exemple de Sydney),

cela n'a pas été effectué ici, parce que les pompiers ont refusé d'être exposés à de l'eau régénérée (risque de vaporisation de l'eau par la chaleur en cas d'intervention, et donc d'aspiration), ce qui a conduit à dimensionner les conduites d'eau potable comme s'il n'y avait pas d'eau régénérée.

Mais la plus grande valeur ajoutée est foncière. En effet, la création de lacs artificiels avec l'eau régénérée par le promoteur du site de Mawson Lakes a augmenté la valeur des terrains directement autour du lac d'environ 400% (de 300.000-400.000 AUD à 1,2M AUD !)⁸⁵.



e) Salisbury (recharge de nappe)

L'eau de pluie alimentant le projet de Mawson Lakes provient du site de recharge de nappe (ASR) de Parafield opéré par la municipalité de Salisbury en coopération avec United Water. John Radcliffe nous indique que le coût de pompage en entrée-sortie vers et depuis l'aquifère est de 55 cents/m³⁸⁶. Selon Stéphanie Rinck-Pfeiffer de United Water (Rinck-Pfeiffer et al.), le coût du pompage, sans compter le traitement ni les canalisations, est compris entre 8 et 18ct/m³, en fonction des volumes pompés, du taux d'amortissement et des durées de vie espérées. Il est donc moindre en général que le coût d'extraction des agriculteurs, qui varie entre 12 à 34ct/m³ et prend en compte les coûts du capital, les coûts opérationnels et les volumes typiques de production.

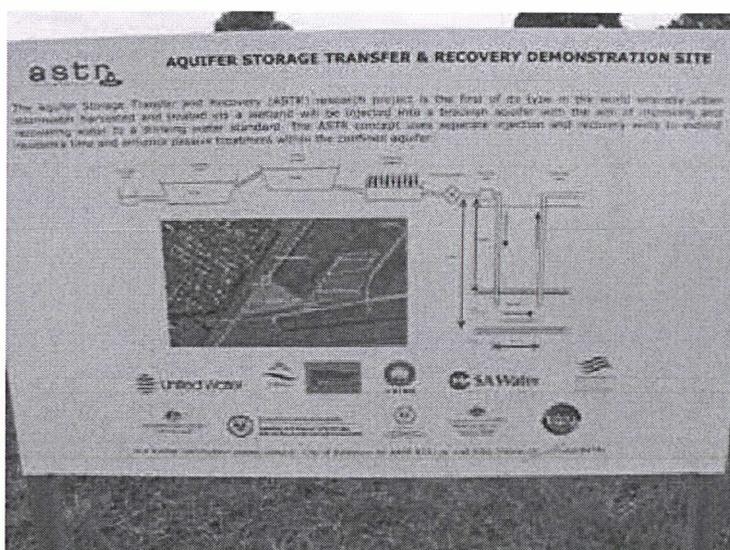
⁸⁵ Sources : <http://www.domain.com.au/Public/SearchResults.aspx?mode=buy&state=SA&areas=North+%26+North+East+Suburbs&sub=Mawson+Lakes&page=1> et [http://www.mawsonlakes.com.au/llweb/mawsonlakes/main.nsf/images/pdf_fs_land.pdf/\\$file/pdf_fs_land.pdf](http://www.mawsonlakes.com.au/llweb/mawsonlakes/main.nsf/images/pdf_fs_land.pdf/$file/pdf_fs_land.pdf)

⁸⁶ Ce chiffre paraît élevé à la mission, étant donné le prix de vente 50 cents à Mawson Lakes.

Un des contrats d'approvisionnement qu'a la municipalité aurait fixé le prix de vente de cette eau à 90 cents/m³. L'objectif de la ville est en tout cas d'obtenir un retour sur investissement de 15% pour l'ensemble des contrats de vente.

La rentabilité de ce projet de recharge de nappe a incité la ville à lancer un nouveau projet de recharge, transfert et récupération (ASTR = Aquifer Storage, Transfer and Recovery) en collaboration avec United Water (Photo 12). L'opérateur Rudi Regel estime le coût de forage à environ 60.000 AUD par puit, à partir des coûts observés pour la recharge de Parafield. Les conduites de 170m de longueur et les pompes reviennent à environ 150.000 AUD par puit. Pour 10 puits, l'investissement initial s'élèverait ainsi à plus de 2M AUD, sachant que le projet bénéficie de subventions publiques, qui rendent à nouveau l'analyse économique difficile, d'autant plus que c'est un projet pilote. Les coûts opérationnels de pompage et de maintenance des pompes varieraient quant à eux entre 6 et 9 cents/m³.

Photo 12



f) Willunga

John Radcliffe nous présente un autre projet de réutilisation dans la région d'Adélaïde. Le projet initial a été selon lui un des rares à ne pas avoir eu de subvention et à être économiquement viable malgré cela. Il consiste à pomper de l'effluent chloré de classe B voire C de la STEP de Christies Beach à 13 km pour une irrigation en goutte-à-goutte de vigne. Le prix de vente y est de 53 cents/m³ (AATSE, 2004).

Une extension du projet est actuellement en phase d'évaluation par la Commission Nationale de l'Eau pour une éventuelle subvention. Celle-ci prévoit notamment la construction d'une troisième station de traitement et l'alimentation par double réseau d'eau régénérée pour de nouveaux quartiers. Le cabinet de consultants Marsden Jacobs Associates a fait l'analyse économique du projet et tablé sur un taux de rendement interne (TRI) de 6%. Afin de l'atteindre, SA Water et les autres partenaires du projet (dont le gouvernement de South Australia) demandent une subvention de 19,8M AUD...

g) Salina Cruz

L'investissement initial pour la station Degrémont de Salina Cruz se chiffre à 72,3M USD, dont 63,8M pour le traitement des eaux industrielles et le dessalement (« PTAR ») et 8,5M pour le traitement des eaux municipales (« PTAN »). La PTAR est en fonctionnement depuis 1999, la PTAN depuis 2002. Notons qu'à l'époque de la finalisation du projet, 1 USD valait à peu près 6 pesos mexicains, aujourd'hui, le cours de change est de 1 :11 environ. Il existe deux contrats avec le client PEMEX qui finance l'ensemble du projet dans le cadre d'un contrat BOT (Build-Operate-Transfer) sur 12 ans.

Le premier contrat couvre la PTAR, le deuxième la PTAN. Dans les deux cas, Degrémont facture à PEMEX un tarif pour l'exploitation (fixe), les coûts variables (sur facture : part variable de l'électricité, réactifs, enlèvement des boues) et l'amortissement de l'investissement initial (principal indexé sur l'inflation et le taux de change, intérêts). Les coûts variables du contrat PTAN sont facturés au volume (une partie en peso, une partie en dollar) selon la formule suivante : (volume traité) • 0,2444 • indice d'inflation (~1,435).

La consommation électrique pour l'ensemble des trois stations (dessalement, industriel, municipal) s'élève à environ 3,5 GWh qui correspondent à une facture d'environ 3,8M pesos par mois, soit un prix moyen du kWh d'environ 1,1 pesos. 75% de la consommation électrique seraient dus à l'osmose inverse.

Sur la base de ces données, les auteurs ont procédé à un calcul approximatif du coût de l'eau régénérée en fonction des différents traitements subis et des volumes de chacun des traitements. Pour cela, ils ont réparti, en concertation avec l'opérateur de la station Erik Lezama, les coûts du contrat PTAR sur les opérations de dessalement et de traitement des eaux industrielles. Malgré l'imperfection de cette méthode et son caractère d'aperçu instantané, elle permet de préciser le coût des différents types de réutilisation.

Tableau 8: Estimation du coût unitaire des traitements de Salina Cruz

	PTAN municipal	PTAR industriel	PTAR dessalement
Volume traité (m ³ /mois)	129.000	259.000	404.352
OPEX fixes et variables	733.300	2.447.000	5.373.000
CAPEX	1.446.000	2.140.000	8.560.000
TOTAL (MXN)	2.179.300	4.587.000	13.933.000
Coût unitaire (MXN/m ³)	16,8	17,7	34,5
Coût unitaire (USD/m³)⁸⁷	1,56	1,64	3,21

Le Tableau 8 récapitule les résultats de cette comptabilité analytique et montre aussi l'effet volumique pour la rentabilité des contrats de réutilisation. En effet, le traitement des eaux industrielles, bien que plus de deux fois plus cher que celui des eaux municipales, ne s'en distingue pas en termes de coût volumique, en raison des volumes plus importants. Les conditions « ceteris paribus » (qualité d'eau comparable en sortie, distance par rapport au

⁸⁷ Le taux de change utilisé est celui du 18 juillet 2007 mentionné en introduction de la partie IV (1 USD = 10,76 MXN).

client final identique) permettent de voir aussi très clairement l'avantage en termes de coût de la réutilisation par rapport au dessalement, lequel est de l'ordre de 1 à 2.

Mentionnons enfin que le modèle de co-développement de Salina Cruz, où l'industriel PEMEX subvient à l'épuration des effluents des urbains pour qui ce traitement devient gratuit – malgré le fait qu'il leur profite aussi – nous semble digne d'intérêt, et généralisable à d'autres villes de pays en voie de développement.

h) San Luis Potosí

Le contrat pour la station Degrémont de San Luis Potosí a été signé avec la Comisión Estatal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (CEAS) en 2001 pour 2 ans de construction et 18 ans d'opération. Il se chiffre à 653M Pesos, soit environ 60M USD. Ce chiffre inclut tous les frais de supervision, d'assurance, les commissions et les intérêts du projet.

La construction de la STEP seule se chiffre à 400M pesos. L'investissement pour les conduites vers le client industriel CFE (Comisión Federal d'Electricidad : centrale électrique à 40km) est d'environ 165M pesos, celui pour les conduites agricoles (15 km) est de 19M pesos. L'investissement net du projet est donc de 585M pesos, soit quasiment 90% du coût total du projet.

Le financement du projet se répartit entre 193M pesos de capital, 226M pesos du fonds fédéral FININFRA et un prêt de la banque mexicaine BANOBRAS à hauteur de 234M pesos. Pour autant, la part de FININFRA dans le financement de la construction (sans frais de supervision, d'assurance, de commissions et d'intérêts) est de 40%, celui du capital 34% et celui du prêt 26%.

Les opérations ont démarré en 2006 pour 18 ans. La CFE paie 8,88 pesos/m³ à la CEA. Etant donné le volume mensuel de 648.000m³, cela représente une facture mensuelle de 5,75M pesos. Le reste est financé par le gouvernement fédéral. Pour la CFE, ce prix de 8,84 pesos/m³ est plus de 33% inférieur au tarif CNA de 13,2527 pesos/m³ qui s'applique à la zone de disponibilité 2 dans laquelle se trouve la centrale électrique.

De même que pour la STEP de Salina Cruz, le binôme a essayé de calculer le coût des traitements primaire et secondaire, sachant qu'une partie des eaux primaires (250L sur 860L7sec) suivent le traitement secondaire qui est nécessaire pour pouvoir utiliser l'eau régénérée dans les tours de refroidissement. Il a pour cela réparti les coûts opérationnel et du capital en concertation avec l'opérateur de la station, Carlos Mendez. Le coefficient pour le traitement primaire est de 25%, celui du traitement secondaire de 67% et celui du traitement des boues de 8%. Le Tableau 9 récapitule les résultats de cet exercice :

	Primaire	Secondaire
Volume traité (m ³ /mois)	648.000	648.000
OPEX	381.750	1.023.090
CAPEX	2.868.250	7.686.910
TOTAL (MXN)	3.250.000	8.710.000
Coût unitaire (MXN/m ³)	5,0	13,4
Coût unitaire (USD/m³)	0,46	1,22

Tableau 9 : Estimation du coût unitaire des traitements primaire et secondaire à San Luis Potosí

En excluant la part de l'investissement du calcul du coût unitaire, on trouve des valeurs sensiblement plus faibles, soit 0,59 pesos/m³ pour le traitement primaire et 1,58 pesos/m³ pour le traitement secondaire. Cependant, ce résultat est basé sur l'hypothèse de volumes identiques pour les deux traitements. Si l'on utilise le volume en entrée du traitement primaire pour calculer son coût unitaire, on obtient 0,17 pesos/m³ (sans l'investissement) et 1,29 pesos/m³ (avec l'investissement).

V) Développement durable

On ne saurait traiter la question de la réutilisation sans aborder les enjeux du développement durable qui la concerne aussi bien du point de vue environnemental que social. Rappelons d'abord le principe de soutenabilité tel qu'il a été formulé dans le Rapport Brundtland. Le développement durable est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (CMED, 1987). L'intérêt de cette définition consiste à placer les limitations du potentiel à satisfaire les besoins courants et futurs non pas du côté de l'environnement, mais du côté de la technologie et de l'organisation sociale. Si le principe de développement durable est devenu un guide de l'action politique, économique et sociale, le débat sur les questions pratiques reste intense : Qu'est-ce qui doit être soutenu durablement ? Comment ? Et pour qui ?

Lundin (1999) a essayé de transposer le principe de développement durable dans le domaine de l'eau de manière holistique : « Un système durable de gestion de l'eau urbaine devrait, dans une perspective de long terme, fournir les services requis tout en protégeant la santé humaine et l'environnement, avec un minimum de ressources rares. » L'objectif d'une gestion durable des ressources est donc de satisfaire la demande des générations actuelles et futures de manière sûre et équitable, en concevant des systèmes intégrés et adaptables, en optimisant l'efficacité des usages de l'eau et en faisant des efforts continus pour préserver et rétablir les écosystèmes naturels. Parmi les critères pour évaluer la gestion durable de la ressource eau, Asano (2006) présente l'objectif « Encourage le recyclage et la réutilisation de l'eau », en avançant les actions nécessaires suivantes pour l'atteindre : sauvegarder des sources d'eau de qualité pour d'autres usages, développer de nouvelles méthodes de recyclage et de réutilisation, éviter la dégradation environnementale par une gestion en cycle fermé des eaux usées traitées. Cet objectif doit être rendu compatible avec les objectifs de l'approvisionnement pour les populations en eau potable, du maintien de la santé publique et de la préservation des écosystèmes à long terme.

C'est ici qu'interviennent des questions d'éthique environnementale, c'est-à-dire de l'application du principe de responsabilité morale en ce qui concerne la gestion des ressources naturelles. Celles-ci ont émergé notamment face au constat de la dégradation sérieuse de l'environnement par des activités humaines, telles que la surexploitation de ressources naturelles. La question posée est d'abord celle de la répartition équitable de l'eau, étant données les grandes disparités de disponibilité d'un côté et de besoins humains de l'autre. L'autre grande question est celle du principe de précaution : Est-ce que des activités humaines doivent être entreprises s'il y a un risque potentiel, mais non démontré pour l'environnement ou la santé publique ?

Toutes ces questions sont présentes de manière très concrète en matière de réutilisation. Quel est son impact réel par rapport à d'autres solutions d'approvisionnement en eau (barrage, dessalement) ? Quels sont ses conséquences à long terme sur la santé humaine, notamment en ce qui concerne des facteurs encore très mal appréciés, comme les perturbateurs endocriniens ? Comment intégrer l'incertitude liée à ces risques dans les décisions de politique publique ? Dans ce qui suit, nous allons essayer d'éclaircir certaines de ces questions à partir de nos observations de terrains.

1. Comparaison des alternatives de traitement

Dans un premier temps, il s'agit de remettre la réutilisation en perspective par rapport aux autres solutions de traitement des eaux usées disponibles. Nous nous référons pour cela aux données collectées par Bruce Durham (Véolia) qui comparent 11 formes d'approvisionnement en eau en fonction de leurs coûts et de leurs consommations en énergie (Tableau 10).

a) Consommation énergétique

Bien qu'incomplet et imparfait, le tableau suivant permet de mettre en évidence les différences de coût, mais aussi de consommation énergétique de différents types de traitement de l'eau, dont de nombreux traitements à des fins de réutilisation. Durham précise néanmoins que toutes ces données sont purement indicatives, les valeurs réelles dépendant de la taille, des caractéristiques et de la conception spécifique du projet, de la qualité de l'eau en entrée, de la taille du système, des possibilités de cogénération et du coût de l'énergie, du financement et des subventions.

Tableau 10 : Comparaison entre différents sources d'eau selon Bruce Durham, Veolia Water (différentes sources, septembre 20006)

Solutions	Données indicatives de CAPEX en €/m ³ /jour	Données indicatives d'OPEX en €/m ³	Données indicatives de consommation énergétique en kWh/m ³	Prix au consommateur en % du prix de l'eau potable	Commentaires
Pompage dans une nappe phréatique		0,10 – 0,20			
Importation d'eau de surface		0,41 – 1,33 (selon les sources)	1,8 – 2,8		Fonction de la distance, de l'élévation et du site
Traitement tertiaire après traitement secondaire (filtration sur sable, titre 22)	928 – 1.815	0,27 – 0,37		77%	Eau tertiaire régénérée de Durban 40% moins chère que l'eau potable
Réutilisation potable indirecte ou industrielle directe après traitement secondaire d'eaux saumâtres (osmose inverse: Brackish)	586 – 1.137	0,11 – 0,46	1,27	>100% pour l'industrie	Plus de 120 installations au monde avec nouveau projets de 330,000 m ³ /j. Prix à l'industrie en général > prix potable selon économie de coûts dans le processus (jusqu'à 4x coûts de l'utilisation)

Solutions	Données indicatives de CAPEX en €/m³/jour	Données indicatives d'OPEX en €/m³	Données indicatives de consommation énergétique en kWh/m³	Prix au consommateur en % du prix de l'eau potable	Commentaires
Water Reverse Osmosis, BWRO)					d'eau potable)
Traitement d'eaux de nappe saumâtres pour réutilisation potable ou agricole (BWRO)	544 – 1.271	0,25 - 0,35	1,2		Risque d'abstraction d'eau de nappe. Les coûts de traitement de la saumure peuvent être excessifs.
Traitement membranaire d'eau de mer pour réutilisation potable ou agricole (OI)	776 – 1.857	0,63 – 0,74	2,6 – 3,7		Technologies pour eau de mer (peu d'encrassement en absence de vapeur)
Traitement hybride membranaire et thermique (Seawater Reverse Osmosis et BWRO)	Au cas par cas	<0,80			Synergies entre le système de traitement et le système énergétique
Traitement thermique d'eau de mer pour reutilisation potable (Multi-Effect Distillation, MED ⁸⁸)	1.023 – 1.412	<0,70	1,5 & vapeur en excès		Stations petites ou grandes avec eau de mer eutrophiée. Quasiment sans prétraitement. Température du process 63 – 75°C
Traitement thermique d'eau de mer pour reutilisation potable (Multi-Stage Flash, MSF ⁸⁹)	1.050 – 3.150	>0,80	4 – 4,3		Stations très grandes avec de l'énergie bon marché. Température de process 100 – 110°C
Vendeurs d'eau dans la rue dans des quartiers peri-				400 – 2.000%	USD 14/m ³ pour vendeurs de rue en Jordanie

⁸⁸ Le MED, aussi appelé « multi-effect evaporation » est la technique la plus ancienne pour le dessalement d'eau. La technique initiale consiste à transférer de la chaleur sous forme de vapeur vers l'eau de mer à travers différentes étapes.

⁸⁹ Le MSF est une version améliorée et simplifiée du MED et constitue la technique la plus utilisée aujourd'hui pour le dessalement.

Solutions	Données indicatives de CAPEX en €/m ³ /jour	Données indicatives d'OPEX en €/m ³	Données indicatives de consommation énergétique en kWh/m ³	Prix au consommateur en % du prix de l'eau potable	Commentaires
urbains sans accès à l'eau potable					
Eau en bouteille	n/a	n/a		10.000%	

Il montre notamment la consommation généralement plus importante d'électricité pour le dessalement comparé à la réutilisation d'eaux usées. Cet avantage de la réutilisation est crucial dans un contexte de changement climatique et d'émergence d'un marché des quotas d'émissions qui permet de chiffrer précisément l'externalité de la surconsommation énergétique. Pour citer Geoff Roberts : "Desalinated water is like bottled electricity". Prenons l'exemple de stations de dessalement utilisant de l'électricité de centrales thermiques, comme ceci est la règle pour les stations des pays du Golfe Persique. On peut estimer la surconsommation électrique du dessalement par rapport à la régénération (à des fins agricoles) à 2 kWh/m³ en moyenne. Or, chaque kWh d'électricité produite par une centrale thermique au fioul correspond à une émission moyenne de 725 g de CO₂⁹⁰ (entre de 545-900 g). Dans le cadre des projets du « mécanisme de développement propre »⁹¹, 5,4 milliards USD de projets ont été réalisés pour 508 millions de tonnes de CO₂ économisés⁹². Ceci correspond à un prix de la tonne de CO₂ d'environ 10,60 USD ou 7,90€. Ainsi, le surcoût « CO₂ » du dessalement peut être estimé à 1,15 cents d'€/m³ d'eau traitée. Mais si l'on considère que le prix de la tonne de CO₂ pourrait atteindre 100€ d'ici quelques années, comme ceci est notamment discuté par Patrick Criqui (2007), alors le surcoût CO₂ serait de 14,5 cents d'€/m³.

Cependant, dans une perspective de développement durable, la surconsommation d'électricité peut poser problème pour la réutilisation quand on la compare à l'utilisation d'eaux de nappe, notamment dans des situations où les eaux usées ont un fort contenu en sel et exigent donc des traitements membranaires spécifiques. En outre, les eaux de surface stockées dans les barrages (cas australien) permettent aussi la production d'électricité « sans CO₂ » dans le cas de l'existence d'une centrale hydroélectrique. Sa valeur devrait théoriquement venir en déduction du prix du traitement de l'eau, si l'on procédait à une analyse holistique du cycle eau-énergie.

a) Impact environnemental et social

⁹⁰ Source : http://www.debatpublic-epr.org/participer/questions_reponses.html?id=3

⁹¹ Le mécanisme de développement propre (MDP) a été créé dans le cadre du protocole de Kyoto afin de permettre aux pays développés de réaliser leurs objectifs en investissant dans des projets dans les pays en développement. Il est la réponse aux demandes des pays en développement (PED) d'un mécanisme financier qui appuie le développement économique en adoptant des méthodes de production plus « propres ». Le mécanisme génère des crédits d'émission sur la base de projets d'investissement dans un pays en développement. Ces projets déterminent des réductions d'émissions de gaz par rapport à une situation de référence. Ces droits peuvent être stockés ou échangés et doivent faire l'objet d'un partage entre l'investisseur étranger et le pays ou le partenaire hôte.

⁹² Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Protocole_de_Ky%C5%8Dto

Dans l'approche développement durable, il faut cependant aussi prendre en compte l'impact plus général d'une technologie sur son environnement. Cela concerne la modification ou la destruction d'espaces naturels par la construction d'un barrage ou d'un canal. La construction d'un barrage implique le plus souvent le déplacement de villages ou de villes entières comme dans le cas du barrage des Trois Gorges dont la construction s'achèvera en 2009. La mise en eau de ce réservoir aura aussi pour conséquence l'engloutissement de près de 1.300 mines de charbon, 300.000 mètres de latrines rurales⁹³, des milliers de tombes ainsi que 2,9 millions de tonnes de débris de tous genres (Savoie, 2003). Les constructions de canaux de transport d'eau (comme le projet non réalisé du canal Rhône-Catalogne) quant à eux requièrent des expropriations de terres agricoles et modifient le paysage existant. Cela concerne aussi le dessalement qui pose le problème du traitement de la saumure, c'est-à-dire de l'eau à très haute concentration en sel qui est un co-produit du dessalement. Il a été démontré que le rejet de cette eau en mer par des émissaires peut, en fonction des courants et de la vitesse de mélange de cette eau avec l'eau moins saline, détruire l'ensemble du biosystème marin environnant.

A cet égard, la réutilisation semble avoir moins d'impact sur son environnement, parce qu'elle permet de fermer le cycle d'eau, et partant, de mieux contrôler le rejet d'effluents dans le milieu naturel.

Reste que la valorisation précise de ces pertes environnementales (notamment la consommation ou destruction d'espaces naturels), voire du désagrément esthétique engendré par la modification de certains paysages, doit encore être développée pour pouvoir être prise en compte systématiquement dans l'évaluation des projets et ainsi permettre le choix des meilleures solutions en termes de durabilité. Or, la valeur attribuée à ces pertes dépend fortement du degré de prise de conscience environnementale des populations qui croît généralement à partir d'un certain niveau de développement du pays (l'environnement est devenu un sujet prioritaire en Europe, alors que d'autres problèmes priment dans les pays subsahariens), mais qui varie aussi en fonction des pays (on peut avancer que la conscience environnementale est plus développée dans les pays du Nord de l'Europe que dans ceux du Sud).

Enfin, on peut argumenter que le recours à la réutilisation permet de mettre en places de nouveaux écosystèmes, notamment dans les pays en voie de développement. En effet, avant la réutilisation, les STEP ont souvent été considérées comme simples centres de coût, permettant le traitement d'un déchet. C'est bien la raison pour laquelle 70% des STEP au Maroc ne fonctionnent plus aujourd'hui à cause d'un manque de fonds pour leur entretien. Avec la régénération des eaux usées et leur revente pour réutilisation, la STEP peut devenir un centre de profit.

Parmi les modèles « gagnants-gagnants » qui peuvent être développés grâce à la réutilisation, mentionnons d'abord la symbiose « urbains et agriculteurs » telle qu'elle s'effectue, bien que de manière imparfaite, à Mexico. En effet, comme le mentionne la FAO, « la source d'eau la plus viable pour l'agriculture urbaine et péri-urbaine est l'eau usée traitée » (FAO, 2004). Le fait que la réutilisation puisse favoriser une agriculture plus saine en milieu péri-urbaine tout en traitant le problème des effluents est d'autant plus remarquable que la population mondiale ne cesse de croître et qu'il s'agira, d'ici quelques années, de nourrir 9 milliards de personnes, dont la plupart vivront dans les agglomérations urbaines.

Une autre synergie peut exister entre les urbains et des industriels comme par exemple PEMEX qui a accepté de traiter des eaux usées municipales dans la STEP qu'il a financé, parce que ceci lui permet d'augmenter sa ressource en eau de process par la voie de la

⁹³ Il s'agit bien de la longueur totale de latrines qui seront ainsi noyées dans l'eau. Cela peut donner un aperçu de la pollution par des excréments humains que la construction du barrage entraînera.

réutilisation. Pour la ville de Salina Cruz, cette solution permet d'assainir la ville et donc d'améliorer le cadre de vie. De même, ce sont les besoins de l'électricien CFE qui ont été à l'origine de la construction de la STEP de San Luis Potosí, laquelle contribue à améliorer l'assainissement de la ville.

b) Politiques publiques

La prise en compte des impacts de développement durable est poussée par les politiques publiques des Etats australiens. Au New South Wales, un « Urban Sustainability Trust Fund » a été créé et doté de 80M AUD sur 5 ans. Il vise à encourager les collectivités locales à concevoir des projets innovants générant des bénéfices multiples en termes de développement durable, aussi bien en ce qui concerne l'eau que l'énergie. Les subventions doivent ainsi faire émerger une approche plus holistique des problèmes environnementaux au niveau local.

Par ailleurs, les contraintes environnementales et sociales sont inscrites dans les projets. C'est ainsi que l'appel d'offre pour la station de dessalement de Sydney par contre exige de l'opérateur d'assurer une « compensation verte » (« green offset ») correspondant à la consommation d'électricité de la station, par exemple par la plantation d'arbres ou la construction de capacités de production d'énergies renouvelables (éolienne ou solaire).

Les projets mexicains de dessalement ne semblent pas encore prendre en compte sérieusement les externalités du dessalement. Le projet de San Tintin (dessalement de 7l/sec, faible débit il est vrai) ne prévoit aucune mesure de compensation pour la consommation électrique engendrée.

Malgré tout, les considérations environnementales et sociales sont présentes dans les projets impliquant des grandes entreprises, comme on l'a vu pour PEMEX et CFE : par le biais des contraintes imposées par les pouvoirs publics sur les entreprises, celles-ci remplissent ainsi leur rôle de catalyseur de développement, à un degré certes moindre que dans un pays très avancé comme l'Australie.

2. Méthodes d'évaluation et d'aide à la décision

Afin de prendre des décisions « durables », les opérateurs du secteur de l'eau et de l'assainissement doivent d'abord établir leur « contexte de développement durable » (Lundie, 2005). Pour cela, ils doivent évaluer l'ensemble des capitaux dont ils disposent. Hawken et al. (1999) distinguent quatre formes de capital :

1. le capital humain, sous forme de travail, d'intelligence, de culture et d'organisation ;
2. le capital financier, sous forme de liquidités, d'investissements et d'instruments monétaires ;
3. le capital manufacturé, incluant les infrastructures, les machines, les outils et les usines ;
4. le capital naturel, composé de ressources, de systèmes vivants et de services rendus par les écosystèmes.

Par le passé, le choix des solutions à moindre coût par la plupart des entreprises a souvent conduit à la dégradation du capital naturel. Par opposition, l'application des principes de développement durable requiert une prise en compte de tous ces capitaux et leur intégration dans une grille d'évaluation unique. Car elle reconnaît l'interdépendance entre les capitaux financier et naturel et vise à protéger l'environnement sur le long terme afin de garantir la plus grande valeur économique pour toutes les parties concernées.

a) Evaluation des critères de durabilité

Hellström et al. (2000) distinguent cinq types de critères communément acceptés comme étant pertinents pour l'analyse d'un système d'eau et d'assainissement :

1. les critères sanitaires et hygiéniques ;
2. les critères socio-culturels ;
3. les critères environnementaux ;
4. les critères économiques (rentabilité interne d'un investissement, mais aussi rentabilité économique au niveau de la société) ;
5. les critères fonctionnels et techniques.

Lundie et al. (2006) et Kärman et al. (2005) présentent et discutent différents outils d'évaluation qui correspondent à ces différents critères.

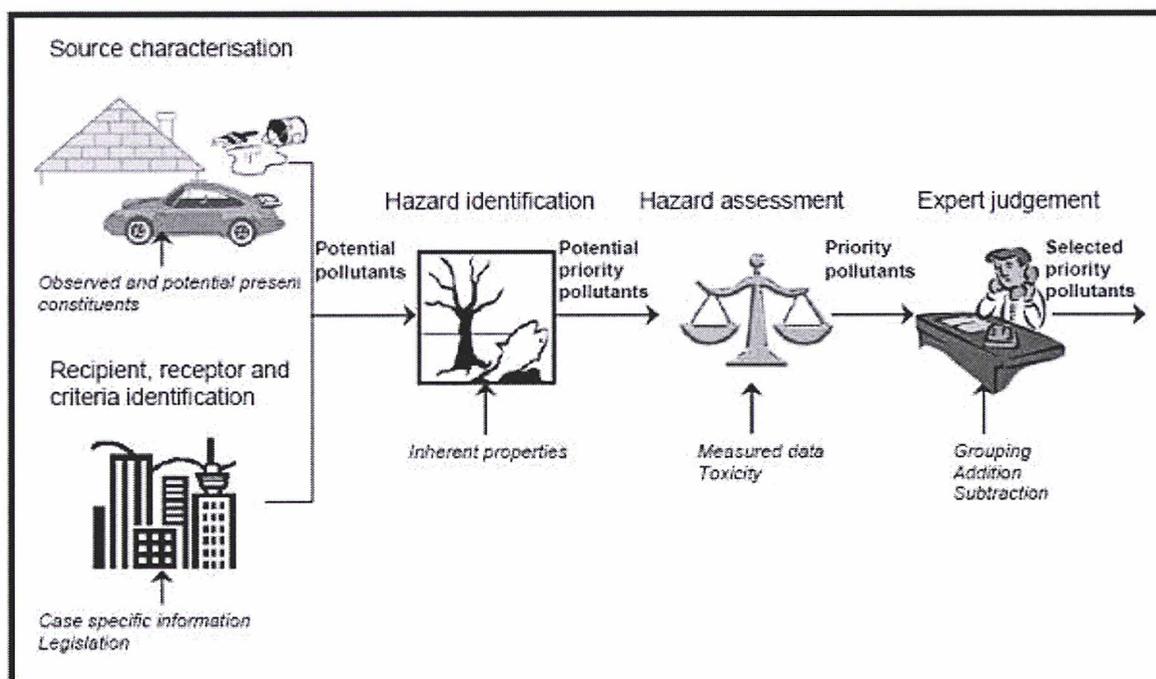
Life-cycle costing (LCC)

Le « life-cycle costing » ou l'analyse en termes de cycle de vie quantifie les coûts financiers sur toute la durée de vie d'un produit ou d'un système de services. Elle tente de prendre en compte tous les coûts pour les différentes parties prenantes affectées, telles que les producteurs, les distributeurs, les utilisateurs et les gestionnaires de déchets. C'est ainsi que l'analyse économique du LCC va bien au-delà des évaluations financières traditionnelles qui ont un cadre d'analyse restreint, p.ex. les coûts pour une entreprise. Les applications du LCC ne sont pas encore très développées par rapport à l'évaluation du cycle de vie environnemental (voir ci-dessous).

Evaluation du risque chimique

L'analyse quantitative du risque a été appliquée à ce type d'évaluation. Contrairement aux pathogènes, nous sommes exposés à un grand nombre de substances provenant de différents produits commercialisés. Une méthodologie de criblage initial a été proposée pour identifier les substances susceptibles de présenter un danger en rapport avec l'utilisation d'eau potable ou non potable. Cette méthode inclut des analyses chimiques, des méthodes d'analyse spécialement développées, des mesures de toxicité, l'identification de dangers et une évaluation qualitative des risques. L'approche pour sélectionner des polluants prioritaires sur la base de l'identification et de l'évaluation de risques chimiques est décrite schématiquement dans le graphique suivant (Kärman, 2005).

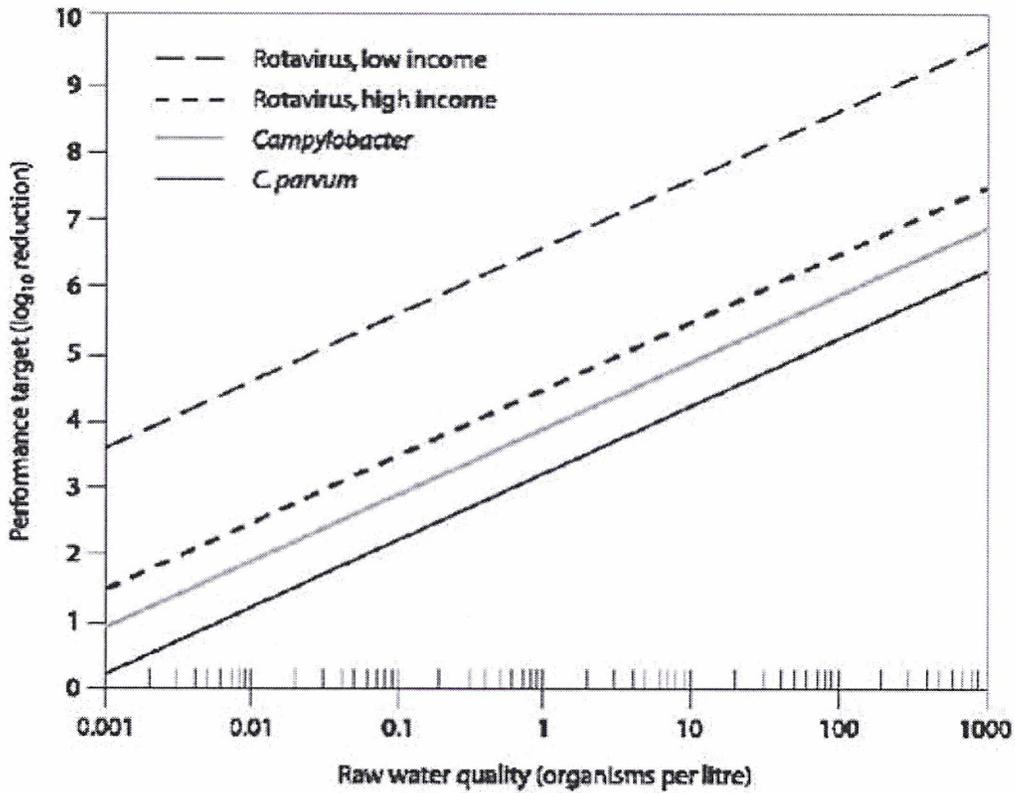
Graphique 9



Evaluation du risque microbien

Cette évaluation a émergé parallèlement à l'évaluation du risque chimique et se concentre sur l'analyse d'exposition et à la modélisation dose-réponse pour mesurer le risque inhérent aux pathogènes présents dans l'eau. Le Graphique 10 montre par exemple les objectifs de performance pour quelques pathogènes en fonction de la qualité des eaux brutes (pour atteindre 10^{-6} DALYs par personne et par an), comme développés par l'OMS en 2004 (Kärman et al., 2005) : lorsque la qualité des eaux brutes diminue (concentration plus grande de pathogènes en abscisse), la performance du traitement (log-performance de réduction en ordonnée) doit augmenter en proportion.

Graphique 10



Evaluation du cycle de vie environnemental

Cet outil permet de calculer et d'évaluer des « inputs » (demandes de ressources) et des « outputs » environnementaux (émissions dans l'air, l'eau, le sol) ainsi que leurs conséquences environnementales potentielles pour un produit ou un service donné sur l'ensemble de son cycle de vie. L'évaluation est basée sur une analyse de masse et de processus d'options alternatives et utilise des modèles d'impact environnemental régional et global.

Empreinte environnementale (EE)

L'empreinte environnementale (ou « Environmental Footprint ») est principalement un outil pour évaluer les caractéristiques de consommation de populations ou d'entités économiques. Le résultat de l'analyse est un seul indice montrant la surface de terres ou d'eau qui est nécessaire pour fournir l'énergie ou la matière consommées par une personne, une population, une organisation ou une économie. D'autres modèles ont été développés pour améliorer la mesure initiale qui se limitait aux terres directement utilisées par un producteurs en négligeant l'impact de fournisseurs en amont de chaîne de production. L'EE est facilement communicable à un auditoire large, mais est moins standardisée internationalement que l'analyse de cycle de vie.

Modélisation de performance technique

Selon les types d'intervention dans la gestion du cycle de l'eau considérés pendant le processus de planification, il peut y avoir différentes approches pour caractériser la performance technique des différentes solutions. Généralement, des critères telles que la

résistance et la flexibilité du dispositif sont pris en compte. La robustesse fait référence au risque d'arrêt de l'équipement en dehors des cycles de maintenance habituels. La flexibilité a trait à la capacité de l'équipement à satisfaire des scénarii futurs (notamment l'extension ou la modification des infrastructures existantes).

Modélisation de performance sociale/Analyse des communautés

Les caractéristiques des différentes options déterminent l'approche adaptée pour évaluer leur performance sociale. Des statistiques peuvent être développées pour mesurer la capacité ou le consentement à payer pour le projet. La création d'emplois est un bénéfice social qui peut être utilisé comme paramètres d'évaluation. Jusqu'à un certain degré, l'acceptation de différentes options par la communauté et le niveau de compréhension et de conscience de la part du public peuvent ressortir d'enquêtes, si le processus de prise de décision ne se fait pas avec une représentation large de la communauté ou au sein d'un comité de pilotage. Livingston (2006) souligne néanmoins qu'un processus participatif est clairement plus efficace pour atteindre la durabilité sociale que l'injection des résultats quantitatifs d'une évaluation d'impact social dans le processus de prise de décision. Enfin, certaines analyses incluent des indicateurs qualitatifs de l'adéquation de l'allocation des risques entre les usagers et les gestionnaires du système et la capacité organisationnelle de gérer certaines options.

b) Reporting « Triple Bottom Line » et décisions multicritères

La méthode du "Triple bottom line" (TBL) a été développée par la Global Reporting Initiative (2002) dans le cadre de son travail sur le reporting de développement durable. Elle n'est pas un outil à proprement parler comme ceux présentés précédemment, mais décrit quels indicateurs peuvent être pertinents pour la performance de développement durable d'une entreprise et comment l'entreprise devrait collecter et présenter l'information sur chacun de ces indicateurs. TBL fait référence aux trois catégories de critères à prendre en compte : économiques, environnementaux et sociaux.

Si des analyses classiques du type coût-bénéfice permettent de comparer des alternatives sur la base d'un seul critère (le coût relatif lié aux différentes conséquences), l'approche TBL exige un cadre d'analyse rendant possible l'utilisation de plusieurs critères à la fois. Le défi consiste en effet à trouver une unité de mesure commune pour différents types d'impact environnementaux afin de rendre une comparaison possible quand la simple détermination des coûts relatifs est impossible (PMSEIC, 2003). Cela peut être par exemple la confrontation de l'impact sur la végétation côtière d'un rejet en mer avec l'effet de serre généré par l'énergie nécessaire pour traiter de l'eau à un niveau de qualité adapté à la réutilisation.

Les méthodes d'aide à la décision multicritères répondent à cette exigence et permettent ainsi de dégager une option préférée par les étapes suivantes : Après avoir structuré le problème de décision à résoudre, il s'agit d'articuler et de modéliser les préférences des acteurs (indifférence, préférence forte ou faible, « au moins aussi bien que », incomparabilité). Ces préférences peuvent être déterminées par une classification directe ou des comparaisons deux à deux. Et elles peuvent s'appuyer sur des données ordinales ou cardinales. Ces évaluations sont ensuite agrégées et évaluées, notamment par des analyses de sensibilité pour déterminer l'influence de certains indicateurs sur le résultat final. Il existe aujourd'hui différents outils d'analyse multicritères qui se distinguent notamment par leur modélisation des préférences. Le plus célèbre est peut-être ELECTRE III développé initialement par Bernard Roy (1990).

L'utilisation de l'approche TBL et des outils d'aide à la décision multicritères est très répandue en Australie.

Parmi les opérateurs rencontrés lors de l'étude, Gold Coast Water Corporation par exemple a développé une approche TBL pour sa stratégie de réutilisation (GCW, 2007). Les critères environnementaux choisis sont la qualité du flux, de l'eau de mer et de l'eau souterraine, le volume du flux et les émissions de gaz à effet de serre. Les critères sociaux couvrent l'impact sur la communauté, l'acceptation par celle-ci et l'équité. Les critères économiques enfin sont la substitution à l'eau potable, le profil de risque (notamment la sécurité d'approvisionnement, le risque de ne pas pouvoir vendre toute l'eau régénérée) ainsi que le coût de l'ensemble du système sur un cycle de vie.

Dans le cas du Pimpama Coomera Masterplan (GCW, 2003), une évaluation multicritères a été menée sur les trois catégories de facteurs environnementaux, sociaux et économiques. Les aspects étudiés étaient l'eau, la salinité, l'émission de gaz à effet de serre et les coûts. A d'abord été vérifiée la capacité de différentes options à satisfaire des conditions minimum de santé publique et de standard de service. Ces options ont ensuite été comparées à l'aide de différentes évaluations techniques, environnementales, financières et sociales. Outre des analyses de coût (« value for money »), GCW a utilisé des outils d'analyse des risques (conséquences indirectes, consultation du public).

La ville de Sydney a elle aussi mené une évaluation « triple bottom line » pour comparer les cinq options du projet de récupération d'eaux de pluie et d'eaux souterraines à Sydney Park. Les critères écologiques retenus sont l'élimination de substances polluantes, la production d'eau dont la qualité dépend de son usage et la réduction des émissions de gaz à effet de serre par une consommation énergétique plus parcimonieuse. Les critères sociaux sont la contribution du projet à la sécurité publique, à la santé publique, à la qualité de vie et à la sensibilisation du public. Enfin, une analyse économique a comparé l'investissement total, les coûts d'opération et de maintenance, les coûts de cycle de vie (incluant les deux premiers ainsi que les coûts de renouvellement) et les coûts marginaux par unité d'eau potable économisée (Ecological Engineering, 2007).

Sydney Water a développé un ensemble d'outils (« toolkit ») présenté dans le tableau suivant pour mener la phase de planification d'un projet. Celle-ci prévoit notamment des ateliers publics et des enquêtes, ainsi qu'un jury citoyen pour la phase de prise de décision (Kärroman, 2005).

Tableau 11

	Outils économiques	Outils sociaux	Outils techniques	Outils environnementaux	Outils d'aide à la décision
<i>Préparation du projet</i>	Flux actualisés pour les options présélectionnées. Mise à jour du risque acceptable. Estimation du coût sur le cycle de vie.	Ateliers de communautés. Enquêtes. Estimation quantitative du risque microbiologique.	Revue technique des options présélectionnées. Planning de réalisation. Atelier d'évaluation du risque.	Evaluation de l'impact environnemental pour les options présélectionnées : → étude sur la flore, la faune, le patrimoine → analyse de cycle de vie du projet	Analyse multicritères. Jurys citoyens. Analyse coût-bénéfice.

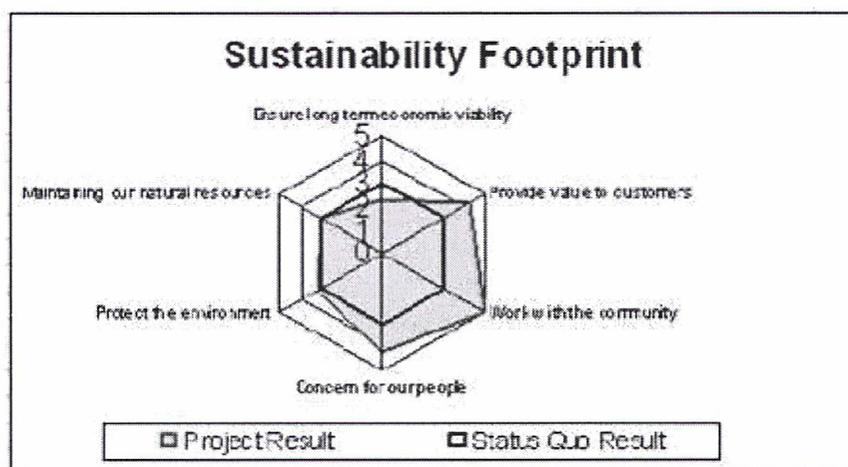
Parmi les autres méthodes multicritères développées dans les différentes régions australiennes, citons celle de South East Water Limited (Kärrman, 2005). L'entreprise a formulé six principes de développement durable qui servent de base pour l'évaluation de tous les projets. A titre d'exemple, le principe de protéger l'environnement dans une rivière peut être couvert par le critère de restauration de la biodiversité. Le projet examiné sera donc noté de 1 à 5 en fonction de sa capacité à détruire ou à conserver la biodiversité (3 = aucun impact). Tous les critères ont la même pondération, et le résultat pour un principe est obtenu en moyennant les notation pour tous les critères correspondant à ce principe. Un résultat possible est illustré dans le Tableau 12.

Tableau 12

Principe de soutenabilité	Facteur de pondération	Elément de la « Triple Bottom Line »	Facteur global de pondération (%)
<i>Assurer la viabilité économique de long terme</i>	0.33	Economique	33
<i>Fournir de la valeur aux clients</i>	0.11	Social	34
<i>Travailler avec la communauté</i>	0.11		
<i>Se soucier des gens</i>	0.12		
<i>Protéger l'environnement</i>	0.16	Environnemental	33
<i>Gérer les ressources naturelles</i>	0.17		

Ces résultats peuvent ensuite être intégrés dans un « profil de durabilité » qui compare l'option examinée avec le cas de base (Graphique 11).

Graphique 11



Cette représentation graphique visualise l'impact de développement durable et facilite ainsi la participation de la communauté dans la phase initiale de définition de critères. La méthode est cependant contrainte par les principes de développement durable définis ex ante et donc sans

la participation du public. En outre, elle ne prend pas en compte les aspects techniques des projets.

3. Développement durable et participation

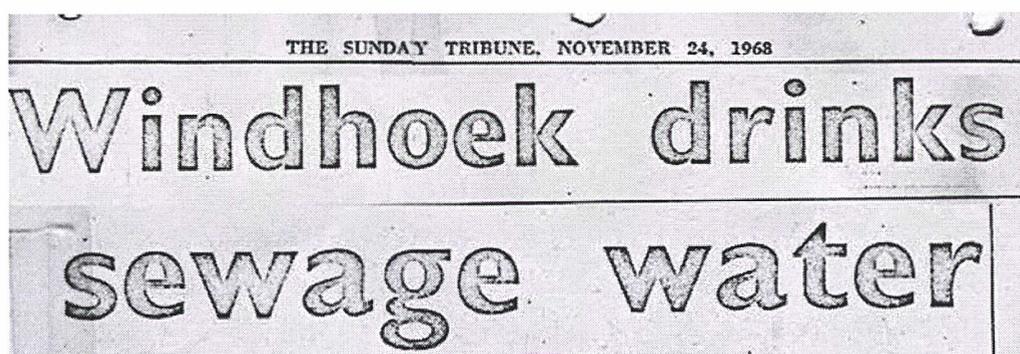
Parmi les outils facilitant le processus de décision, on peut distinguer ceux orientés vers le produit final (le choix effectué) et ceux dirigés vers le processus. Nous avons jusqu'ici discuté les premiers qui sont généralement des méthodes multicritères avec un objectif plus ou moins fixé et se basent sur la connaissance d'experts. Ils utilisent l'optimisation et suggèrent différents modèles mathématiques permettant le traitement des données et leur pondération, avec plus ou moins de dialogue avec les parties prenantes.

Cependant, ces outils peuvent ne pas être adaptés aux situations réelles de planification et de prise de décision. Par exemple, dans un processus de développement d'un plan de développement urbain, le but à atteindre n'est pas donné et les critères sont de natures quantitative et qualitative. C'est alors que les derniers outils basés sur le dialogue et la participation révèlent leur importance. La participation publique a été définie par Beierle et Crayford (2002) comme « plusieurs mécanismes mis en place intentionnellement pour engager le public non spécialisé ou ses représentants dans la prise de décision administrative ».

Les méthodes basées sur le processus définissent l'objectif comme une partie même du processus et de la négociation et visent des solutions « satisfaisantes ». Ces approches permettent rarement d'optimiser, étant donnée l'absence d'un objectif unique dit « optimal ». Les outils de dialogue incluent aussi bien les forums d'échange que des comités citoyens consultatifs, des cellules citoyennes de communication et d'apprentissage ou des jurys citoyens.

Les arguments pour l'implication du public sont nombreux et divers (Kärman, 2005). Elle permet la définition d'indicateurs de développement durable, elle crée du soutien social pour les projets, elle promeut l'ouverture, réduit les malentendus et augmente la probabilité de succès de réformes importantes. Enfin, la participation serait une réaction aux mécanismes de décision basés sur la science, apportant d'autres formes de savoir dans le processus politique que le savoir scientifique.

En pratique, l'on peut retenir que la participation permet d'inclure les valeurs des parties prenantes dans le projet, d'améliorer la qualité des décisions, de résoudre des conflits entre intérêts concurrents, de créer de la confiance, de faciliter la mise en oeuvre du projet et d'éduquer et d'informer le public. D'ailleurs, les différents outils d'aide à la décision multicritères des différents opérateurs australiens impliquent des éléments participatifs à divers moments du processus. La participation doit aussi permettre d'éviter les campagnes de discrédit des médias, dont un exemple est donné ci-dessous.



Kärrman et al. (2005) en tout cas prétendent que la planification et la prise de décision de développement durable doivent reposer sur des outils orientés produit et des outils orientés processus, parce que le savoir nécessaire pour des évaluations complètes est de nature variée et d'échelle incommensurable.

Conclusion

La réutilisation des eaux usées renvoie finalement à un débat ancien entre les tenants de l'eau pure (ou soi-disant telle) et les défenseurs de l'eau purifiée. En France, le choix a d'abord été porté vers les eaux pures (Belgrand est allé chercher l'eau de sources à Fontainebleau et Vanne), avant que les stations de traitement des eaux brutes prélevées dans des rivières proches des villes ne s'imposent dans les années soixante. Si les pays développés purifient aujourd'hui leurs eaux, on retrouve l'alternative eau pure/eau purifiée entre certains pays comme la Libye qui transporte (à grands frais) de l'eau pure (en fait fossile) sur des centaines de kilomètres (« Great Man Made River ») et les pays du Golfe comme les Emirats Arabes Unis qui tirent l'essentiel de leurs ressources du dessalement de l'eau de mer. La réutilisation des eaux usées, qui sollicite l'inconscient sur sa conception de l'eau comme source de vie, doit adopter une démarche progressive dans ses usages autorisés afin de ne pas brusquer la société.

En France, la réutilisation des eaux usées a déjà lieu dans une très large mesure, mais de manière indirecte. Les eaux usées traitées, et rejetées dans les fleuves et rivières français, peuvent être pompées un peu plus loin en aval par des agriculteurs dont la seule contrainte réglementaire est de ne pas aller prendre l'eau directement en sortie de STEP. Cependant, la législation en vigueur n'est pour l'instant pas favorable aux projets de réutilisation, notamment à cause des distances imposées entre des espaces arrosés avec de l'eau régénérée et le public. Mais ces normes pourraient être revues à la lumière des standards OMS pour rendre possible la réutilisation non potable (usages urbains, agricoles ou environnementaux). La pratique de projets pilotes comme celui de Grau-du-Roi sera certainement très utile pour améliorer la connaissance des risques et de leur maîtrise. Pour l'instant, l'état de la ressource en eau en France n'est pas critique. Mais comme l'a recommandé le Président de Gold Coast Water, Shaun Cox, il est toujours préférable d'avoir pris le temps de tester la réutilisation que de devoir s'y précipiter comme le fait son pays aujourd'hui puisque sous contrainte forte en eau depuis quelques années. La France doit donc initier dès aujourd'hui des projets de réutilisation d'envergure sur lesquels elle pourra capitaliser de l'expérience.

Au niveau mondial, on pourrait en effet observer à l'avenir un clivage grandissant entre les pays développés et les pays en développement, comme Jimenez et al. (2001b) en font l'hypothèse. La législation des pays les plus avancés, par l'effet de la judiciarisation de toutes les activités publiques et privées, pourrait devenir encore plus rigide, exigeant des qualités d'eau à la sortie des stations de traitement telles que la réutilisation pour des usages moins nobles deviendra la solution la plus abordable techniquement et économiquement. Les pays en voie de développement par contre utiliseront la régénération et la réutilisation des eaux usées pour répondre à leurs besoins croissants en eau et aussi pour graduellement améliorer la qualité des effluents. Reste que ce scénario pose problème en ce qu'il pourrait limiter l'exportation de produits agricoles des pays pauvres vers les pays riches à cause de leur « contamination » par des eaux insuffisamment traitées. C'est pour cette raison que le binôme recommande, comme d'autres auteurs impliqués sur le sujet, l'adoption d'une législation graduée à vocation internationale en fonction du niveau de traitement des eaux usées, pour clarifier les différentes qualités et les usages permis.

D'un point de vue économique, les coûts et les bénéfices des projets de réutilisation doivent être analysés au cas par cas, tellement le contexte local peut influencer l'équilibre des

différentes solutions d'approvisionnement en eau. On peut cependant conclure que là où l'eau devient rare et où la réglementation se durcit, la réutilisation a de bonnes chances de constituer une solution intéressante et viable à moyen terme. Un système de taxes incitatives peut aussi promouvoir la réutilisation tout aussi efficacement comme l'a montré le cas du Mexique.

Le bilan en termes de développement durable de l'eau régénérée est nettement plus favorable que celui d'autres sources alternatives comme le dessalement, ou même, selon les situations, le stockage de l'eau dans des barrages. La réutilisation des eaux usées répond à cette aspiration qu'ont de plus en plus de nos concitoyens d'opter pour un développement raisonné, et pour cette raison il est possible que ce label écologique soit l'argument de vente principal de la technique, en France notamment.

Restent les risques sanitaires liés à la réutilisation qui ne doivent en aucun cas être sous-estimés, notamment en ce qui concerne les substances encore inconnues aujourd'hui. C'est dans ce domaine que le plus de progrès sont encore à réaliser, pour faire de la réutilisation une solution sûre et durable dans les stratégies de gestion de la ressource eau. L'analyse des risques de la réutilisation devrait aussi permettre de réfléchir de manière plus générale à la manière dont nous pouvons réduire l'impact environnemental de nos activités (utilisation d'engrais, consommation de médicaments) afin de trouver un chemin de développement économique et social lui aussi plus durable.

ANNEXES

1. Critères australiens de potabilité

Composant	Concentration (en mg/l par défaut)	Satisfait aux critères australiens d'eau potable (OUI par défaut)
Aluminium	0.15	
Antimoine	<0.001	
Arsenic	<0.001	
Baryum	0.037	
Bore	<0.10	
Cadmium	<0.0005	
Calcium	32.67	
Chlorure	39.9	
Chrome	<0.005	
Cuivre	<0.005	
Fluorure	0.14	
Fluorure (résultat client)	0.00	
Ratio de fluorure	0.00	
Iode	<0.020	
Fer	0.46	NON
Plomb	<0.002	
Magnésium	4.86	
Manganèse	0.086	
Mercure	<0.0001	
Molybdène	<0.005	
Nickel	<0.01	
Nitrate	<1.0	
Nitrite	<0.1	
pH	7.0	
Sélénium	<0.002	
Argent	<0.002	
Sodium	24.4	
Sulfate	9.0	
TDS	184	
Dureté totale (CaCO ₃)	101.6	
Couleur réelle	97.7 (CU)	NON
Turbidité	38.6 (NTU)	NON
Zinc	0.03	

2. Détail des clients potentiels du projet « Western Corridor »

Catégorie	Industriels potentiels	% d'eau régénérée acceptable	Usage en eau régénérée (k.m ³ /j)	% Total
<i>Centrales</i> (54.7%)	Tarong	100	80	42.5
	Swanbank	100	23	12.2
<i>Aliments en conserve, boissons</i> (0.3%)	Aliments en conserve	5	0.2	0.1
	Abattoirs	5	0.1	0.1
	« Small goods »	5	0.04	0
	Boissons sans alcool	5	0	0
	Ind. laitière	5	0.1	0.1
	Jus	35	0.2	0.1
<i>Autres industries</i> (15.8%)	Usines d'aluminium	85	1.1	0.6
	Papeteries	85	1.7	0.9
	Usines de produits chimiques	85	5.1	2.7
	Usines de ciment	85	0.17	0.1
	Usines sidérurgiques	85	20	10.6
	Fabricants de panneaux à fibres	85	1.4	0.7
	Installations de stockage à froid	85	0.2	0.1
<i>Parcs industriels</i> (29.2%)	Parc d'entreprises de Swanbank (futurs papeteries et aciéries)	100	35	18.6
	Parc de Bundamba-Bremer	100	4	2.1
	Futur parc de Ebenezer Ouest	100	5	2.7
	Usage local à la station d'Oxley	100	6	3.2
	Usage local à la station de Wacol	100	4	2.1
	Propriété industrielle de Wulkuraka	100	1	0.5
TOTAL			188.3	100

3. Personnes rencontrées ou interrogées

France :

Avronsart (Jean), VP eau potable et assainissement de la Communauté Urbaine d'Arras

Bahri (Akissa), Institut International pour la Gestion de l'Eau

Blin (Eric), responsable du projet Grau-du-Roi

Courtecuisse (Arnaud), Economiste à l'Agence de l'Eau Artois-Picardie

Delporte (Claude), Senior Manager, Services Process and Innovation à Ondeo IS

Durham (Bruce), Ressources Alternatives à Véolia Eau

Garnier (Bertrand), Directeur Technique à Ondeo IS

Haffner (Hugues), Délégué à la ressource en eau à Suez Environnement

Hubert (Pierre), hydrogéologue à l'Ecole des Mines de Paris (Fontainebleau)

Labre (Jacques), Directeur des relations institutionnelles, Suez Environnement

Landais (Eric), Directeur Marketing et Partenariats, Degrémont

Lazarova (Valentina), chef de projet et de département au CIRSEE (Centre International de Recherche sur l'Eau et l'Environnement) pour le traitement et la réutilisation des eaux usées

Lechantoux (Gaëtan), Directeur Général des services techniques de la Communauté Urbaine d'Arras

Lecomte (Jean-Paul), bureau des eaux au Ministère de la Santé et des Solidarités

Mallet (Thierry), Président Directeur Général, Degrémont

Maria (Augustin), doctorant à l'Ecole des Mines de Paris (CERNA)

Martin (Yves), ancien Directeur d'Agence de l'Eau

Mourrut (Etienne), Député-maire du Grau-du-Roi

Noël (Coralie), Directrice adjointe à l'OIEau

Perianu (Thomas), Responsable des études prospectives à Suez Environnement

Poujol (Roger), ingénieur en chef assainissement de la Lyonnaise des Eaux

Rideau (Jean-Pierre), responsable Directive Cadre Européenne au Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

Robaux (Lionel), Directeur Général Adjoint à l'OIEau

Roux (Pierre), directeur technique de la Lyonnaise des Eaux

Saout (Charles), chef du bureau des eaux au Ministère de la Santé et des Solidarités

Schlosser (Robert), médecin expert pour les risques sanitaires

Trancart (Jean-Luc), directeur délégué de la Lyonnaise des Eaux

Valade (Hélène), directrice développement durable à Suez Environnement

Mexique :

Albarrán (Lucy Equihua), Directrice technique de Degrémont Mexique.

Carrot (Laurent), Directeur général des concessions de Degrémont Mexique

Castillo (Marcela Martínez), Chef du département réutilisation des eaux de la Ville de San Luis Potosí

Jiménez Cisneros (Blanca E.), groupe de traitement et de réutilisation des eaux à l'Institut d'Ingénierie de l'UNAM (Université Nationale Autonome du Mexique)

Lezama (Erik), Gérant de la STEP de Salina Cruz pour Degrémont Mexique

Martínez (Roberto J. Contreras), Gérant, Sous-direction générale de l'eau potable, Comisión Nacional de Agua

Martínez (José Dolores Nunez), Gérant de la raffinerie PEMEX de Salina Cruz

Méndez (Carlos), Gérant de la STEP de San Luis Potosí

Motto (Rodolfo), Directeur Commercial de Degrémont Mexique

Olmos (Humberto Méndez), Administrateur des projets spéciaux de Degrémont Mexique

Ramírez (Alberto Rojas), Directeur de l'assainissement de la Ville de San Luis Potosí

Australie :

Burnett (Jolyon), Chief Executive Officer (CEO) de l'Association de l'Irrigation en Australie

Bursill (Don), ancien Président du Comité pour les Recommandations sur l'Eau potable en Australie

Byleveld (Paul), Responsable de l'unité Eau au Ministère de la Santé du New South Wales

Capati (Bill), Responsable du Planning des Infrastructures à Gold Coast Water

Cox (Shaun), CEO de Gold Coast Water

Davis (Chris), CEO de l'Association Australienne de l'Eau

Dennien (Barry), Directeur exécutif pour la planification et la politique régionale, Commission de l'Eau du Queensland

Derksema (Chris), Chef du développement environnemental de la Ville de Sydney

Dillon (Peter), Responsable pour l'utilisation et la réutilisation de l'eau au CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)

Donlon (Peter), Directeur technique de la Water Services Association of Australia

Drinan (Gynt), Chef de projet senior à la Ville de Sydney

Foley (Andrew), Responsable de la performance commerciale à Gold Coast Water

Haines (Nicole), Chef de projet senior de la Ville de Sydney

Hayward (Bob), Directeur du projet de recyclage de l'eau à Sydney Water

Heidenreich (Craig), Responsable de la STEP de Bolivar à United Water (Adélaïde)

Jackson (Greg), Responsable de l'équipe Réglementation pour la réutilisation de l'eau au Ministère des ressources naturelles et de l'eau du Queensland

Listowski (Andrzej), Responsable de l'eau et de l'énergie pour l'Autorité du Parc Olympique de Sydney

Loos (Terry), représentant de l'Australian Water Association à Brisbane

Marles (Christopher), Responsable du développement commercial à South Australia Water

Noble (Glenn), Coordinateur pour le recyclage de l'eau à Gold Coast Water

Power (Kaye), Conseiller senior en réglementation, Ministère de la Santé du New South Wales

Radcliffe (John), Commissaire, membre de la Commission Nationale de l'Eau d'Australie

Regel (Rudi), Chercheur senior à United Water (Adélaïde)

Richardson (Barbara), responsable de l'eau et des barrages au Ministère de l'Environnement et de la Conservation du New South Wales

Rinck-Pfeiffer (Stéphanie), Responsable de la recherche et du développement à United Water (Adélaïde)

Ringham (John), (Chief Operating Officer COO) de South Australia Water

Roberts (Geoff), Directeur de Manidis Roberts

Seillier (Jean-Michel), Responsable du projet du Western Corridor pour Veolia

Sherb (Matt), Ministère de l'Eau et de l'Energie du New South Wales

Simon (Marc), Directeur de Degremont Australie

Simms (Terry), Project Operations Manager, Sydney Water

Stevens (Daryl), Scientifique principal, Arris Communication and Research

Warmington (John), Chef de projet au sein de la branche Planning de l'Infrastructure de Gold Coast Water

Espagne :

Mujeriego (Rafael), professeur d'ingénierie environnementale à l'Universidad Politécnica de Catalogne, Barcelone, Espagne

Maroc :

Kerby (Mario), Directeur pour l'agriculture et l'agrobusiness intégrés à USAID Maroc

Bibliographie

AATSE (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering). 2004. *Water Recycling in Australia*. Victoria, Australia.

Achilleos et al., 2005. "Development of tools and guidelines for the promotion of the sustainable urban wastewater treatment and reuse in the agricultural production in the Mediterranean countries"

Anderson et al., 2001. "Climbing the ladder : a step by step approach to international guidelines for water recycling"

Angel, Martin, 1998. « La nature a-t-elle un prix ? »

Asano, Takashi et al. 2006. *Water Reuse : Issues, Technologies, and Applications*, chapitre 3 « Characteristics of Municipal Wasterwater and Related Health and Environmental Issue »

Baumont, Samuel, ORS Ile-de-France (date inconnue). « Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Ile-de-France »

Beierle, T. C. et J. Cayford. 2002. *Democracy in practice. Public participation in environmental decisions*. RFF Press, Washington DC.

Beuhler, Mark (date inconnue). "Application of Modern Financial Portfolio Theory to Water Resource Portfolios"

BIPE/SPDE, 2005. « Les services collectifs d'eau et d'assainissement en France : données économiques, sociales et techniques ».

Blumenthal et al., 2000. "Guidelines for wastewater reuse in agriculture and aquaculture : recommended revisions based on new research evidence"

Blumenthal, U., et A. Peasey. 2002. "Critical Review of Epidemiological Evidence of the Health Effects of Wastewater and Excreta Use in Agriculture." Organisation Mondiale de la Santé, Genève

Bouwer, H.,1991. Groundwater recharge with sewage effluent; *Water Science & Technologie*, 23 :2099-2108

BRLi/SCET. 2002. « Projet de réutilisation des eaux usées traitées de la station d'épuration de Tunis-Ouest ». Etude de faisabilité pour le Ministère de l'Agriculture, DGGR, République Tunisienne

CIE Consultants. 2007. "Pricing principles for recycled water and storm water re-use". Février 2007 (non publié)

Cifuentes, E.; Blumenthal, U.; Ruiz-Palacios, G.; Bennett, S. 1992. "Health Impact Evaluation of Wastewater Use in Mexico". *Public Health Revue*, 19, 243–250.

City of Sydney, 2007. "Water reuse projects"

CMED. 1987. « Notre avenir à tous ». Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU présidée par Madame Harlem Brundtland

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2004. *Water Statistics*. Commission Nationale de l'Eau, Mexico City, Mexique (en espagnol).

Courtecuisse, Arnaud, 1998. « Qualité de l'eau, tourisme et activités récréatives : la recherche d'un développement durable »

Craik, S.A. et al. 2001. "Inactivation of *Cryptosporidium parvum* Oocysts Using Medium- and Low-Pressure Ultraviolet Radiation", *Water Research*, 35, 6, p.1387-1398

Craun, G.F. 1991. "Statistics of Waterborne Disease in the United States", *Water Science Technology*, 24, 2, p.10-15

Criqui, Patrick. 2007. « Facteur 4 : Incitations économiques, innovations technologiques et changements structurels ». Département Energie et Politiques de l'Environnement, Université de Grenoble, présentation à l'Ecole des Mines le 28 février 2007

CSA, 2007. « Enquête CSA pour l'Union des entreprises pour la protection des jardins et des espaces verts (UPJ) »

Deronzier et al., 2006. « La valorisation des aménités du Loir », MEDD

Dillon et al. Urban groundwater recharge enhancement and water recycling.

Ducharne, Agnès ; Sylvain Théry ; Pascal Viennot ; Emmanuel Ledoux ; Eric Gomez et Michel Déqué. 2003. « Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine ». *VertigO*, Vol. 4, No. 3

Ecological Engineering. 2007. "Stormwater and Groundwater Treatment and Reuse at Sydney Park – Options Assessment Report". Draft Report pour City of Sydney, New South Wales Department of Environment and Conservation, Sydney Water Corporation et Transgrid

Ensink et al. "Wastewater use in Pakistan: the cases of Haroonabad and Faisalaba"

FAO, 1988. "World agriculture toward 2000 : an FAO study"

FAO et OMS. 2003. "Expert consultation for launching the regional network on wastewater re-use in the Near East"

FAO. 2004. "L'eau, l'agriculture et l'alimentation". Une contribution au Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau

Fattal, B. et al. "A Fresh Look at Microbial Guidelines for Wastewater Irrigation in Agriculture: A Risk-assessment and Cost-effectiveness Approach"

Fligelman et al., 2006. "Pimpama wastewater treatment plant and recycled water treatment plant". Planning report

Foley, Leah, 2007. "Western Corridor Recycled Water Project Market Assesement"

- Fourmeau, Denis, OIEau, 2002. « Traitement et réutilisation des eaux usées en France: Contexte et perspectives »
- Giblin, Béatrice, 2003. « L'Eau : Une question géopolitique, en France aussi »
- Giraud, Pierre-Noël, 2007. « Economie des Biens Publics Mondiaux ». Présentation à l'Ecole des Mines
- Global Reporting Initiative. 2002. "Sustainability Reporting Guidelines 2002"
- GNFP, 2006. "Hyde Cook & Phillip Park – Water Reuse Feasibility Study". Final Draft.
- Gold Coast City (GCC). 2006. "Gold Coast Waterfuture Strategy". Gold Coast City Council, Gold Coast, Australia
- Gold Coast Water (GCW). 2003. "Pimpama Coomera Water Futures Master Plan Options Report".
- Gold Coast Water (GCW). 2007. "Recycled Water Strategy". Présentation au Ministère français de l'industrie du 2 mai 2007
- Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). 2007. "Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers". Contribution du Groupe de travail I au Quatrième Rapport d'Evaluation du GIEC, Paris, février 2007.
- De Haas, D., 2004. "Pimpama WWTP-RWTP Concept Design". Concept Design Report.
- Hawken, Lovins and Lovins. 1999. *Natural Capitalism. The Next Industrial Revolution*
- Heinzmann, Bernd. "The R&D project Natural and Artificial Systems for Recharge and Infiltration (NASRI) and its relation to the specific water management challenges of Berlin and its international relevance"
- Hellström, D.; U. Jeppsson et E. Kärrman. 2000. "A framework for systems analysis of sustainable urban water management". Environmental Impact Assessment Review 20 (3), 311-322.
- Hemous, Sarah, 2006. « Pré-étude dans le cadre d'un projet de réutilisation des eaux usées traitées de la station du Grau du Roi pour l'irrigation d'espaces verts »
- Hoekstra et al., 2006. "Water footprints of nations : water use of people as a function of their consumption pattern"
- Hopkins et al., 2002. "Operating a water reclamation plant to convert sewage effluent to high quality water for industrial use"
- Hudrey, Steve E. et Elizabeth Hudrey. 2005. *Safe Drinking Water: Lessons from Recent Outbreaks in Affluents Nations*. IWA Publishing
- IPART. 2006. "Pricing arrangements for recycled water and sewer mining"
- JDLE. 2006. "Assainissement: l'échéance européenne". 2 janvier 2006 : <http://www.journaldelenvironnement.net/fr>

- JDLE. 2007a. « Eaux pluviales : le futur flop du crédit d'impôts ». 27 février 2007
- JDLE. 2007b. « Médicaments dans l'eau : différents acteurs mobilisés ». 1^{er} juin 2007
- Jimenez, Blanca (date inconnue). "Wastewater treatment technology and legislation for agricultural reuse"
- Jimenez et al., 2001a. "Removal of a diversity of microorganisms in different stages of wastewater treatment". *Water Science and Technology*, 43(10) :155-162
- Jimenez et al., 2001b. "Social, political and scientific dilemmas for massive wastewater reuse in the world"
- B. Jimenez, 2003. "Health risk in aquifer recharge with recycled water"
- Jimenez et al., 2004. "Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source : 'El Mezquital Valley' case"
- Jimenez, Blanca. 2005. "Treatment Technology and Standards for Agricultural Wastewater Reuse: A Case Study in Mexico". *Irrigation and Drainage*, 54, p.23-33
- Jimenez et al., 2005. "Water quality in a aquifer recharged with wastewater and its possible use for drinking purposes in Mexico", *Revista Latino-Americana de Hidrogeologica*, v.5, p. 111-116.
- Jimenez, Blanca. 2006a. "Irrigation in Developing Countries Using Wastewater". *International Review for Environmental Strategies*, 6 (2)
- Jimenez, Blanca. 2006b. "Marginal-Quality Water Ressources", contribution non officielle pour le chapitre 11 "Agricultural use of marginal-quality water – opportunities and challenges" d'un rapport IWMI (2007, pas encore publiée)
- Jimenez et al., 2006. "Particule size distribution to design and operate an APT process for agricultural wastewater reuse"
- Jimenez, Blanca. 2007. "Helminth Ova Removal for Agriculture and Aquaculture Reuse". présentation Powerpoint, Université Nationale Autonome de Mexico
- Kärman, Erik; Henriette Söderberg; Sven Lundie; Nicholas Ashbolt; Alex Kazaglis; Elizabeth Lai; Daniel Livingston and John Anderson. 2005. "Literature Review: Methodology for Evaluating the Overall Sustainability of Urban Water Systems". The University of New South Wales, Centre for Water and Waste Technology
- Keraita, B.N., et P. Drechsel. 2004. "Agricultural Use of Untreated Urban Wastewater in Ghana." In C.A. Scott, N.I. Faruqi, and L. Raschid-Sally, éditeurs. *Wastewater Use in Irrigated Agriculture*. Wallingford, UK: CABI Publishing.
- Kerby, Mario. "The Drarga wastewater treatment and reuse project : a model for small communities"

Khan, Stuart et David Roser. 2007. "Risk Assessment and Health Effects Studies of Indirect Potable Reuse Schemes". Rapport Final pour la Water Services Association of Australia, Centre for Water and Waste Technology, University of New South Wales

Knott et al. 2007. "SRI Spotlight – Water Treatment Technologies". UBS Investment Research

Kolpin, D.W. et al. 2004. "Urban Contribution of Pharmaceuticals and Other Organic Wastewater Contaminants to Streams during Different Flow Conditions". Science Total Environment, 328, 1-3, p. 119-130

Labre, Jacques. 2003. « 'Marchandisation' et 'marchés de l'eau' dans l'Ouest américain: mythes et réalités »

Lahnsteiner et al., "VATECH. Potable reuse in Windhoek/Namibia"

Lai, T.V. 2000. "Perspectives of Peri-urban Vegetable Production in Hanoi." Papier de réflexion préparé pour le Action Planning Workshop de la CGIAR Strategic Initiative for Urban and Peri-Urban Agriculture (SIUPA), Hanoi, 6–9 June. Organisé par le International Potato Center (CIP), Lima.

Lamotte, Damien, 2002. « Le Mexique : un contexte favorable pour développer une offre privée adaptée à la réutilisation des eaux résiduelles en irrigation ? »

Lazarova, Valentina, 2007a. « Intérêts, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France ». L'eau, l'industrie, les nuisances n°299

Lazarova, Valentina, 2007b. « Rôle de la réutilisation des eaux usées pour la gestion intégrée des ressources : coûts, bénéfices et défis technologiques ». L'eau, l'industrie, les nuisances, N° 227D

Limagne Noire et Somival. « Limagne noire, ou comment l'irrigation recycle les eaux urbaines clermontoises »

Linden, K.G. et al. 2002. "UV Disinfection of *Giardia lamblia* Cysts in Water", Environmental Science and Technology, 36, 11, p.2519-2522

Livingston, D. J. 2006. *Institutions and Decentralised Urban Water Management*. Thèse de PhD (remise en juillet 2006), School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney.

Lundie, S.; G. Peters; N. Ashbolt; E. Lai, D Livingston. 2006. "A Sustainability Framework for the Australian Water Industry". Journal of the Australian Water Association. November 2006

Lundie, Sven ; Nicholas Ashbolt ; Daniel Livingston ; Elizabeth Lai ; Erik Kärman ; Jennifer Blaikie and John Anderson. 2005. "Sustainability Framework: Methodology for Evaluating the Overall Sustainability of Urban Water Systems". The University of New South Wales, Centre for Water and Waste Technology

- Lundin, M. 1999. "Assessment of environmental sustainability of urban water systems". Licentiate thesis, Department of Technical Environmental Planning, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden
- Maresca et al. 2006. « Valoriser l'action publique – Le consentement à payer, un outil au service de la LOLF ». CREDOC
- Marles, Christopher, SA Water, 2004. "South Australian Local Government Roads and Works Conference 2004"
- Marsden Jacob Associates. 2005. "Third Party Access in Water and Sewerage Infrastructure : Implications for Australia". Draft
- Martin, Yves, 1988. « Quelques réflexions sur l'évolution des agences de bassin »
- Maya, Catalina, Blanca Jimenez et J. Schwartzbrod. 2006 "Comparison of Techniques for the Detection of Helminth Ova in Drinking Water and Wastewater", Water Environment Research, 78(2)
- MEDD, 2001. Décret "eau potable" du 20 décembre 2001
- Ministère de l'Environnement, 1994. Arrêté du 22 décembre 1994 : « Systèmes d'assainissement de plus de 2.000 EH »
- Ministerio de Medio Ambiente. 2007. "Proyecto de real decreto por el que se establecen las condiciones básicas para la reutilización de las aguas depuradas". 11 juin 2007
- Mujeriogo et al. 2007a. "The water reclamation and reuse project of El Prat de Llobregat, Barcelone, Spain"
- Mujeriogo et al. 2007b. "Water reuse and integrated resources management in Vitoria-Gasteiz, Spain"
- Natural Resource Management Ministerial Council (NRMMC). 2006. "Australian Guidelines for Water Recycling : Managing Health and Environmental Risks (Phase 1)". Environment Protection and Heritage Council, Australian Health Ministers Conference
- National Water Commission, 2007. "The cost effectiveness of rainwater tanks in urban Australia"
- New South Wales Government (NSWG). 2006. "Metropolitan Water Plan". Sydney, Avril 2006
- NRMMC/EPHC. 2007. *Australian Guidelines for Water Recycling: Augmentation of drinking water supplies* Natural Resource Management Ministerial Council/Environment Protection and Heritage Council, Canberra (version de travail non publiée)
- OMS, 2006. "Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Extreta and Greywater - Volume II : Wastewater use in Agriculture"
- Pinkham et al. 2004. "Case studies of economic analysis and community decision making for decentralized wastewater systems". Rocky Mountain Institute

PMSEIC. 2003: "Recycling Water for Our Cities". Prime Minister's Science, Engineering and Innovation Council, Australia

Programme National de Transfert de Technologie en Agriculture (PNTTA). avril 2000. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA

PNUE et GEC. "Water and wastewater reuse: an environmentally sound approach for sustainable urban water management"

Queensland Water Commission (QWC). 2007a. "Draft report I: Institutional arrangements for Urban Water Supply in South East Queensland". Draft report for consultation, February 2007

Queensland Water Commission (QWC). 2007b. "Our Water: urban water supply arrangements in South East Queensland – Final Report".

Radcliffe, John, 2004. "Water recycling in Australia"

Rhoadess, J.D., 1997. "Sustainability of irrigation: an overview of salinity problems and control strategies."

Rieux et al., 2003. « Estimation du coût moyen du mètre cube d'eau pour l'irrigation dans un bassin versant ». CEMAGREF

Rinck-Pfeiffer et al. "Aquifer storage and recovery with reclaimed water at Bolivar, South Australia"

Roy, Bernard. 1990. "Decision-Aid and Decision-Making". European Journal of Operational Research, 45, 324-331

Safrit, Donald, 2004. "Satellite and decentralized MBR systems – their role in a sustainable approach"

Savoie, Philippe. 2003. « Impact du barrage des Trois Gorges sur le développement durable de la Chine ». Vertigo, 4 (3), décembre 2003 : http://www.vertigo.uqam.ca/vol4no3/art1vol4no3/philippe_savoie.html

Schaëfer et al., 2001. "Recent advances in water recycling technologies"

Schroeder, E.D. et S. Wuertz. 2003. „Chapter 3: Bacteria“. P.57-68 in D. Mara and N. Horan, éditeurs. *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Elsevier Science, Amsterdam, Pays-Bas.

SDAGE Rhône Méditerranée Corse, 1996. « Eutrophisation des milieux aquatiques : Bilan des connaissances et stratégies de lutte ». Note technique SDAGE n°2

Sevin, Hélène, 1997. « L'assainissement des communes touristiques du littoral et de sports d'hiver : critères de choix des traitements »

Siebe, C. et E. Cifuentes. 1995. "Environmental impact of wastewater irrigation in central Mexico: an overview". International Journal on Environmental Health, 5, p.161-173

South Australian Water, 2007. "Christies Beach Wastewater Treatment Plant Upgrade Project"

Sydney Water. "Western Sydney Recycled Water Initiative, Replacement Flows Project"

Sydney Water, 2004. "Rouse Hill Recycled Water Plant"

Trang, D.T., W. van der Hoek, P.D. Cam, K.T. Vinh, N.V. Hoa, et A. Dalsgaard. 2006. "Low Risk for Helminth Infection in Wastewater-fed Rice Cultivation in Vietnam." *Journal of Water and Health* 4 (3): 321–331.

United Water. 2007. "Water recycling in South Australia". Présentation

Van der Hoek, W., M. Ul Hassan, J.H.J. Ensink, S. Feenstra, L. Rashid-Sally, S. Munir, M.R. Aslam, N. Ali, R. Hussain, et Y. Matsuno. 2002. "Urban Wastewater: A Valuable Resource for Agriculture". Research Report 63, International Water Management Institute, Colombo

Watkinson, A.J. et al. 2007 (forthcoming). "Removal of antibiotics in conventional and advanced wastewater treatment: Implications for environmental discharge and wastewater recycling". *Water Research*

Western Corridor Project (auteur non précisé), 2007. « Advanced Water Treatment Process in South East Queensland »

White, Stuart et al. 2006. "Review of the Metropolitan Water Plan: Final Report". Institute for Sustainable Futures at the University of Technology, ACIL Tasman and SMEC Australia, Sydney

World Bank, 2006. "Dealing with scarcity in Singapore: Institutions, strategies, and enforcement"

WSAA. 2005a. "WSAA facts 2005: The Australian Urban Water Industry"

WSAA. 2005b. "Pricing for Recycled Water". Water Services Association of Australia, Occasional Paper No.12, février 2005

WSAA, 2006. "Refilling the glass". Position paper