

# **Guide pour l'utilisation sans risques des eaux résiduaires et des excréta en agriculture et aquaculture**

## **Mesures pour la protection de la santé publique**

Rédigé sous la direction de  
**Duncan Mara**

University of Leeds,  
Leeds, Angleterre  
&

**Sandy Cairncross**

London School of Hygiene and Tropical Medicine  
Londres, Angleterre



Organisation mondiale de la Santé  
Genève 1991

---

Catalogage à la source : Bibliothèque de l'OMS

Mara, Duncan

Guide pour l'utilisation sans risques des eaux résiduaires et des excréta en agriculture et aquaculture : mesures pour la protection de la santé publique / rédigé sous la direction de Duncan Mara et Sandy Cairncross.

1. Eau égouts – effets indésirables 2. Engrais – effets indésirables  
3. Microbiologie sol 4. Microbiologie eau 5. Maladie transmissible – transmission 6. Lutte contre maladie contagieuse  
I. Cairncross, Sandy II. Titre

ISBN 92 4 254248 2

(Classification NLM: WA 785)

© Organisation mondiale de la Santé, 1991

Les publications de l'Organisation mondiale de la Santé bénéficient de la protection prévue par les dispositions du Protocole N° 2 de la Convention universelle pour la Protection du Droit d'Auteur. Pour toute reproduction ou traduction partielle ou intégrale, une autorisation doit être demandée au bureau des Publications et Traductions, Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse. L'Organisation mondiale de la Santé sera toujours très heureuse de recevoir les demandes à cet effet.

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de l'Organisation mondiale de la Santé, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de firmes et de produits commerciaux n'implique pas que ces firmes et produits commerciaux sont agréés ou recommandés par l'Organisation mondiale de la Santé de préférence à d'autres. Sauf erreur ou omission, une majuscule initiale indique qu'il s'agit d'un nom déposé.

Les opinions exprimées dans la présente publication n'engagent que leurs auteurs.

# Table des matières

Avant-propos	V
Résumé d'orientation	1
<b>1 Introduction</b>	<b>25</b>
1.1 Objectifs	25
1.2 Plan de l'ouvrage	26
<b>2 Mise en valeur des déchets d'origine humaine</b>	<b>27</b>
2.1 Utilisation des eaux résiduaires en agriculture	27
2.2 Utilisation des excreta en agriculture	34
2.3 Utilisation des excreta et des eaux résiduaires en aquaculture	37
<b>3 Exemples de réutilisation des déchets d'origine humaine</b>	<b>41</b>
3.1 Utilisation des eaux résiduaires en agriculture	41
3.2 Utilisation des excreta en agriculture	53
3.3 Utilisation des excreta et des eaux résiduaires en aquaculture	60
<b>4 Considérations de santé publique</b>	<b>63</b>
4.1 Infections liées aux excreta	63
4.2 Risques pour la santé	67
4.3 Observations épidémiologiques	75
4.4 Critères de qualité microbiologique	83
<b>5 Aspects socioculturels</b>	<b>98</b>
5.1 Utilisation des excreta	98
5.2 Utilisation des eaux résiduaires	100
<b>6 Aspects écologiques</b>	<b>102</b>
<b>7 Solutions techniques pour la protection sanitaire</b>	<b>105</b>
7.1 Introduction	105
7.2 Traitement des déchets	108
7.3 Limitation à certaines cultures et certains poissons	125
7.4 Epandage d'eaux résiduaires et d'excreta	129
7.5 Limitation de l'exposition humaine	133

<b>8 Planification et exécution</b>	<b>136</b>
8.1 Planification des ressources	136
8.2 Amélioration des pratiques existantes	141
8.3 Nouveaux systèmes	161
8.4 Considérations économiques et financières	177
8.5 Surveillance et évaluation	187
Références	194
Bibliographie	201
Glossaire	202

# Avant-propos

Le présent Guide reprend les résultats essentiels d'une étude menée par l'Organisation mondiale de la Santé avec le soutien financier du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, sur les dangers pour la santé de la réutilisation des déchets. L'objectif général de ce projet et du présent Guide est d'encourager l'utilisation, après traitement, des eaux résiduaires et des produits dérivés des excreta en agriculture et en aquaculture dans des conditions propres à sauvegarder la santé des travailleurs et des consommateurs.

Le Guide est destiné aux planificateurs et décideurs des ministères ou organismes chargés de la santé, des ressources hydriques et de l'agriculture et à tous les autres organismes officiels et ingénieurs-conseils concernés par l'utilisation des eaux résiduaires et des produits dérivés des excreta en agriculture et aquaculture. Son objectif est de limiter la propagation des maladies transmissibles. Aussi l'examen des risques que cette pratique présente pour la santé est-il limité à la contamination microbiologique, à l'exclusion de la pollution chimique.

Les critères de qualité qui sont proposés à cette fin constituent une réactualisation des recommandations formulées en 1973 par un Groupe d'experts (OMS, série de Rapports techniques, N° 517). Les progrès de la recherche appliquée et l'expérience plus vaste acquise dans un certain nombre de pays ont apporté la preuve qu'il est indispensable, par exemple pour sauvegarder la santé du grand public, d'imposer des limites aux quantités d'œufs viables d'helminthes — vers responsables de certaines parasitoses. En revanche, on sait aujourd'hui qu'on pourrait appliquer aux coliformes fécaux des critères de qualité moins rigoureux sans qu'il en découle un risque insupportable pour la population exposée. Ces critères de qualité révisés reposent sur des observations épidémiologiques qui prennent en compte ce risque effectif pour la santé publique plutôt que le risque potentiel apprécié d'après la survie des agents pathogènes sur les plantes cultivées et dans le sol.

Le présent guide a été préparé par le Professeur Duncan Mara, de l'Université de Leeds, et le D<sup>r</sup> Sandy Cairncross, de la London School of Hygiene and Tropical Medicine. Les exemples concrets proviennent principalement des rapports du D<sup>r</sup> Martin Strauss, Centre inter-

national de référence pour l'évacuation des déchets, Dübendorf et du Dr Ursula Blumenthal, London School of Hygiene and Tropical Medicine, d'une étude du Professeur Hillel Shuval et de ses collaborateurs de l'Université hébraïque de Jérusalem, parue dans la série Technical Papers (N° 51) de la Banque mondiale sous le titre «Wastewater irrigation in developing countries; health effects and technical solutions», et des comptes rendus d'un colloque de la FAO sur le traitement et la réutilisation des eaux d'égout en irrigation, qui s'est tenu à Chypre en 1985.

L'avant-projet des recommandations a été revu par un groupe d'experts, lors de la Seconde réunion sur l'utilisation sans risques des déchets d'origine humaine en agriculture et aquaculture, qui a eu lieu à Adelboden (Suisse), en juin 1987. Cette réunion était organisée par le Centre international de référence sur l'évacuation des déchets et l'OMS, avec le concours financier du Programme des Nations Unies pour l'Environnement. La liste des participants à la réunion est reproduite ci-dessous.

## Participants

- Dr Bakir Abisudjak**, Université Panadjaran, Bandung, Indonésie.
- Dr Humberto Romero-Alvarez**, Secrétariat à l'agriculture et aux ressources hydriques, Mexico, Mexique.
- Dr Abdullah Arar**, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, Italie.
- M. Sadok Attallah**, Ministère de la santé publique, Tunis, Tunisie.
- Dr Carl Bartone**, Banque mondiale, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- Dr Eduardo Bauer**, Service d'approvisionnement en eau et d'assainissement, Lima, Pérou.
- Dr Asit Biswas**, International Society for Ecological Modelling, Oxford, Angleterre.
- Dr Ursula Blumenthal**, London School of Hygiene and tropical Medicine, Londres, Angleterre.
- Dr Armando Caceres**, Centro Messamericano de Estudios sobre Tecnología apropiada, Guatemala, Guatemala.
- Dr Sandy Cairncross**, London School of Hygiene and Tropical Medicine, Londres, Angleterre.
- Dr Paul Guo**, OMS, Centre régional du Pacifique occidental pour la promotion de la planification et des études appliquées en matière d'environnement, Kuala Lumpur, Malaisie.
- Dr Ivanildo Hespanhol**, Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse.

- M. John Kalbermatten**, Kalbermatten Associates, Washington, DC, États-Unis d'Amérique.
- Professeur Dunca Mara**, University of Leeds, Angleterre.
- Professeur Warren Pescod**, University of Newcastle-upon-Tyne, Newcastle-upon-Tyne, Angleterre.
- Mme Silvie Peter**, Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, Dübendorf, Suisse.
- D<sup>r</sup> André Prost**, Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse.
- D<sup>r</sup> Alex Redekopp**, Centre de recherche pour le développement international, Ottawa, Canada.
- D<sup>r</sup> Roland Schertenlieb** (*Président*), Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, Dübendorf, Suisse.
- D<sup>r</sup> Donald Sharp**, Centre de recherche pour le développement international, Ottawa, Canada.
- Professeur Hillel Shuval**, Université hébraïque de Jérusalem, Jérusalem, Israël.
- D<sup>r</sup> Martin Strauss**, Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, Dübendorf, Suisse.

# Guide pour l'utilisation sans risques des eaux résiduaires et des excreta en agriculture et aquaculture

Mesures pour la protection de la santé publique

## Résumé d'orientation

### Introduction

L'objectif général du présent Guide est d'encourager l'utilisation des eaux résiduaires et des excreta en agriculture et aquaculture dans des conditions propres à sauvegarder la santé du personnel et du public en général. Dans ce contexte, on entend par «eaux résiduaires» les eaux usées domestiques et les effluents municipaux lorsqu'ils ne contiennent pas d'effluents industriels en quantités appréciables; par «excreta», on entend non seulement les gadoues mais aussi les produits dérivés des excreta, par exemple les boues, notamment celles des fosses septiques. En règle générale, la protection de la santé exige que ces déchets subissent un minimum de traitement pour en éliminer les agents pathogènes. D'autres mesures visant à protéger la santé sont envisagées ici, à savoir les limitations mises à l'emploi des eaux résiduaires et des excreta en agriculture, les techniques d'épandage des déchets et les mesures destinées à limiter l'exposition humaine.

Le présent guide s'adresse principalement aux personnes qui occupent un poste de responsabilité dans les divers secteurs concernés par la réutilisation des déchets et elles ont pour objectif d'empêcher la propagation des maladies transmissibles tout en permettant l'économie des ressources et le recyclage des déchets dans des conditions optimales. L'accent est donc mis sur les mesures visant à limiter la contamination microbienne plutôt qu'à éviter tout risque pour la santé du fait de la pollution chimique, phénomène qui n'a qu'une importance mineure lors de la réutilisation des déchets domestiques et qui est traité de manière appropriée dans d'autres publications. Les aspects purement agricoles ne sont envisagés ici que pour autant qu'ils intéressent la protection de la santé.

Les normes appliquées autrefois à la réutilisation des déchets dans un souci d'hygiène étaient inutilement rigoureuses car elles reposaient seulement sur la possibilité de survie des agents pathogènes. Lors d'une réunion, organisée à Engelberg (Suisse) en 1985 à l'initiative de l'Organisation mondiale de la Santé, de la Banque mondiale et du Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, les partici-

pants — ingénieurs sanitaires, épidémiologies et sociologues — ont proposé une approche plus réaliste de l'utilisation des eaux résiduaires et des excreta traités, sur la base des observations épidémiologiques les plus récentes et les plus probantes. Les recommandations formulées dans le rapport de la Réunion d'Engelberg sont à la base des principes exposés.

## **Plan de l'ouvrage**

Les sections 2 et 3 constituent l'historique de la réutilisation et de la mise à profit des déchets et elles donnent quelques exemples des pratiques actuelles dans diverses régions du monde. Les considérations de santé publique, notamment les implications pratiques des récents progrès épidémiologiques, font l'objet de la section 4, tandis que les facteurs socioculturels sont abordés à la section 5. La section 6 est consacrée à la protection et à l'amélioration de l'environnement grâce à la réutilisation des déchets. Les mesures utilisables en pratique pour assurer la protection de la santé publique font l'objet d'un examen approfondi à la section 7 tandis que la section 8 traite des aspects institutionnels, juridiques et financiers de la planification et de la mise en œuvre des projets.

## **Exploitation des déchets d'origine humaine**

Dans de nombreuses régions du monde, les déchets d'origine humaine sont largement mis à profit. Le Guide traite principalement de trois pratiques, qui sont les plus courantes en la matière :

- l'utilisation des eaux résiduaires en agriculture pour l'irrigation ;
- l'utilisation des excreta pour la fertilisation du sol et l'amélioration de sa structure ;
- l'utilisation des eaux résiduaires et des excreta en aquaculture.

## **Utilisation des eaux résiduaires en agriculture**

Depuis une vingtaine d'années, l'utilisation des eaux résiduaires pour l'irrigation s'est sensiblement développée, spécialement dans les zones arides et des régions à saison sèche, dans les pays industrialisés comme dans les pays en développement. Cette évolution est la résultante de plusieurs facteurs :

- rareté croissante des autres sources d'eau utilisable pour l'irrigation, rendue plus aiguë par le développement de la demande d'eau potable dans les agglomérations urbaines, et prise de conscience, de la part des responsables de la planification des ressources hydriques, de l'importance et de l'intérêt de la réutilisation des eaux résiduaires;
- coût élevé des engrais artificiels et découverte de la valeur des nutriments contenus dans les eaux résiduaires qui accroissent notablement les rendements agricoles;
- démonstration du caractère minime des dangers pour la santé et du risque d'endommagement des sols lorsque les précautions nécessaires sont prises;
- coût élevé des installations perfectionnées de traitement des eaux résiduaires;
- acceptation socioculturelle de cette pratique.

Les eaux résiduaires normales provenant des ménages et des municipalités sont composées d'eau à hauteur de 99% et contiennent 0,1% de matières solides, en suspension, à l'état colloïdal ou en solution, qui associent des matières organiques et minérales, notamment des macro-nutriments tels qu'azote, phosphore et potassium, à côté des micro-nutriments essentiels. Les effluents industriels peuvent apporter de surcroît des composés toxiques, mais en quantités trop faibles pour être nocives, de sorte que seule la sensibilité des cultures au bore doit être prise en considération. Le taux d'épandage des eaux résiduaires est calculé de la même façon que lorsqu'on utilise pour l'irrigation de l'eau non polluée, en tenant compte de l'évapotranspiration potentielle, des besoins correspondant au lessivage et de la régulation de la teneur en sels et de la teneur en sodium.

### **Utilisation des excreta en agriculture**

Dans de nombreux pays d'Asie orientale et du Pacifique occidental, l'épandage d'excreta humains sur le sol pour en maintenir la fertilité constitue une pratique qui remonte à plus de 4 000 ans et c'est parfois la seule solution possible dans les régions où il n'existe pas de réseau d'égout. Dans les pays en développement, la plupart des ménages ne seront toujours pas équipés du tout-à-l'égout dans un avenir prévisible; il faut donc privilégier l'installation de systèmes d'assainissement

autonomes — par exemple une latrine à deux fosses fonctionnant par alternance, une latrine à chasse d'eau ou un cabinet à compostage.

En moyenne, chaque personne produit 1,8 litres d'excreta par jour; ce total comprend 350 grammes de matières solides sèches, 90 grammes de matières organiques, 20 grammes d'azote et divers autres nutriments — principalement du phosphore et du potassium. Outre qu'il détruit les micro-organismes pathogènes, le traitement des excreta fait passer ces nutriments sous une forme plus facilement utilisable dans les zones cultivées et il stabilise les matières organiques, en donnant un meilleur conditionneur de sol. En général, les excreta et les produits qui en dérivent sont épandus sur le sol avant la plantation, à raison, chaque année, de 5-30 tonnes par hectare (t/ha) (10 t/ha = 1 kg/m<sup>2</sup>).

## **Utilisation des excreta et des eaux résiduaires en aquaculture**

L'aquaculture englobe les anciennes méthodes de pisciculture, notamment l'élevage de la carpe et du tilapia, et la culture des plantes aquatiques telles que l'ipomée, la châtaigne d'eau, la truffe d'eau et le lotus. La fertilisation des bassins d'aquaculture au moyen d'excréments et d'excreta constitue une pratique millénaire en Asie; à l'heure actuelle, au moins les deux tiers des poissons élevés dans le monde proviennent de bassins de ce genre. La production chinoise de poissons d'élevage représente 60% du total mondial, alors que la superficie des bassins de pisciculture ne représente que 27% du total mondial; le rendement moyen annuel des bassins chinois est de 3 200 kg/ha mais une gestion intensive des bassins de polyculture permet un rendement de 7 000 kg/ha. Ces poissons d'élevage représentent la source la moins onéreuse de protéines animales.

On peut également élever avec succès des poissons dans les bassins de maturation qu'on trouve dans la succession des bassins de stabilisation des eaux résiduaires: on maintient ainsi un rendement annuel pouvant atteindre 3 000 kg/ha. La vente des poissons d'élevage peut être utilisée pour financer des améliorations dans la gestion et l'entretien des réseaux d'égout municipaux.

## **Exemples de réutilisation des déchets d'origine humaine**

Parmi de nombreux exemples de réutilisation des déchets d'origine humaine, quelques-uns ont été choisis ici pour illustrer la diversité de cette technique, qu'il s'agisse de l'emplacement géographique, du cadre

socioculturel, de l'échelle de l'opération, du procédé de traitement, des techniques d'épandage ou des plantes cultivées. Les exemples exposés en détail concernent les points suivants:

**Utilisation des eaux résiduaires en agriculture:** République fédérale d'Allemagne, Australie, Inde, Mexique, Tunisie.

**Utilisation des excreta en agriculture:** Chine, Etats-Unis d'Amérique, Guatemala, Inde.

**Utilisation des eaux résiduaires et des excreta en aquaculture:** Inde, Indonésie.

## Considérations de santé publique

### Risques pour la santé

Les maladies liées aux excreta sont très répandues dans les pays en développement où les excreta et les eaux résiduaires ont une concentration élevée en agents pathogènes excrétés — bactéries, virus, protozoaires et helminthes. Une trentaine de ces maladies sont assez importantes pour poser un problème de santé publique et bon nombre d'entre elles soulèvent un problème particulier dans les systèmes de réutilisation des déchets. Toutefois, l'utilisation d'excreta et d'eaux résiduaires en agriculture ou aquaculture ne peut faire peser un risque *effectif* sur la santé publique que si *toutes* les conditions ci-dessous sont réunies:

- a) pour un agent pathogène excrété, la dose infectieuse est atteinte *soit* au moment où cet agent est déversé dans un champ ou dans un bassin, *soit* à la suite de sa multiplication dans ce champ ou ce bassin;
- b) la dose infectieuse atteint un hôte humain;
- c) l'hôte est effectivement infecté;
- d) l'infection détermine une maladie ou permet la poursuite de la transmission.

Si la condition d) n'est pas remplie, les conditions a), b) et c) ne font peser qu'un risque *potentiel* sur la santé publique. En outre, si cet

enchaînement est interrompu en un point quelconque, les risques potentiels ne peuvent s'additionner pour constituer un risque effectif.

On sait aujourd'hui concevoir et mettre en œuvre des systèmes de réutilisation des déchets qui ne font courir aucun danger à la santé publique, mais cela suppose la connaissance de l'épidémiologie des infections associées à la réutilisation des déchets. On peut alors définir des normes de qualité microbiologique à imposer aux excreta et aux eaux résiduaires destinés à être réutilisés.

## Observations épidémiologiques

Seule une étude épidémiologique concernant la pratique en cause permet d'évaluer l'importance réelle pour la santé publique d'une méthode de réutilisation des excreta ou des eaux résiduaires : elle permet en effet d'établir si cette pratique se traduit par une augmentation mesurable de l'incidence ou de la prévalence de la maladie ou encore du degré d'infestation ou d'infection par rapport aux valeurs observées en son absence. Cela ne va pas sans poser des problèmes de méthodologie, de sorte qu'il n'existe que peu d'études épidémiologiques bien conçues qui traitent de la réutilisation des déchets d'origine humaine ; on est mieux renseigné sur l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires que sur l'utilisation des excreta en agriculture ou sur l'utilisation des unes ou des autres en aquaculture.

**Irrigation au moyen d'eaux résiduaires.** Un rapport récent de la Banque mondiale (Technical Paper N° 51) fait le point de toutes les études épidémiologiques connues sur l'utilisation d'eaux résiduaires pour l'irrigation et se termine par les conclusions suivantes :

- L'irrigation de cultures au moyen d'eaux résiduaires non traitées détermine chez les consommateurs de plantes cultivées et chez les ouvriers agricoles une augmentation significative des infestations intestinales par des nématodes. Les ouvriers agricoles, spécialement lorsqu'ils travaillent pieds nus, sont exposés à des infestations plus intenses, en particulier par les ankylostomes, que leurs collègues qui travaillent dans des champs irrigués par un autre procédé.
- L'irrigation au moyen d'eaux résiduaires convenablement traitées n'entraîne aucune augmentation des cas d'infestation intestinale par des nématodes, ni chez les ouvriers agricoles, ni chez les consommateurs de plantes cultivées.

- L'irrigation des cultures maraîchères au moyen d'eaux résiduaires non traitées comporte un risque effectif de transmission du choléra, et sans doute de la typhoïde.
- Le bétail mis à paître dans des pâturages irrigués au moyen d'eaux résiduaires brutes risque d'être infesté par le ver solitaire (ténia inerme), mais le risque de téniasse n'est guère attesté chez l'homme.
- On a peu de raisons de penser que les populations vivant à proximité des rizières irriguées au moyen d'eaux résiduaires non traitées puissent être contaminées, soit directement par contact avec le sol, soit indirectement par contact avec des ouvriers agricoles. Dans les collectivités où l'hygiène corporelle est rigoureuse, les effets nocifs pour la santé se limitent en général à une surincidence de gastro-entérites bénignes, souvent d'origine virale, mais on peut également observer un excédent d'infections bactériennes.
- L'irrigation par aspersion au moyen d'eaux résiduaires traitées peut favoriser la transmission aéroportée de virus excrétés mais, en pratique, cette éventualité est rare car la plupart des personnes concernées présentent normalement une forte immunité vis-à-vis des viroses endémiques.

Il est clair que lorsqu'on se sert pour l'irrigation d'eaux résiduaires *non traitées*, il existe un risque effectif important d'infections bactériennes, et de parasitoses intestinales dues à des nématodes, alors que le risque de virose est pratiquement nul. Le traitement des eaux résiduaires constitue donc une méthode très efficace pour sauvegarder la santé publique.

**Utilisation des excreta en agriculture.** Dans un rapport récent (N° 05/85), le Centre International de référence pour l'évacuation des déchets (IRCWD) a fait le point des observations épidémiologiques concernant l'utilisation des excreta en agriculture et il est arrivé aux conclusions suivantes:

- L'utilisation comme engrais d'excreta non traités entraîne chez les consommateurs des plantes cultivées et chez le personnel des exploitations agricoles un excédent significatif d'infections intestinales provoquées par des nématodes.
- On est fondé à penser que le traitement des excreta peut réduire la transmission des nématodes.

- L'utilisation d'excreta comme engrais pour le paddy peut provoquer chez les riziculteurs une surmorbidity bilharzienne.
- Le bétail peut être atteint de téniasse mais il est peu probable qu'il puisse contracter une salmonellose.

**Utilisation en aquaculture.** Le rapport de l'IRCWD fait également le point des observations sur la transmission de maladies du fait de l'utilisation en aquaculture d'excreta et d'eaux résiduaires; les conclusions sont moins nettes dans ce cas que dans celui de l'agriculture par suite du volume restreint et de la qualité insuffisante des données disponibles.

Les observations épidémiologiques sont claires dans le cas de la transmission de certaines parasitoses provoquées par des trématodes, principalement *Clonorchis* (douve de Chine responsable de la distomatose hépatique d'Extrême-Orient) et *Fasciolopsis* (grande douve du foie) responsable de la fasciolase, mais elles font défaut quant à la transmission de la schistosomiase (bilharziose) qui n'en constitue pas moins le principal risque potentiel pour le personnel employé dans les bassins de pisciculture engraisés au moyen d'excreta. Aucune observation ne permet de conclure à la transmission de maladies bactériennes par les poissons et les plantes comestibles aquatiques, encore que, là encore, le risque ne puisse être exclu.

### Critères de qualité microbiologique

Les experts qui ont participé à la première réunion relative au projet sur l'utilisation sans risques des déchets d'origine humaine en agriculture et aquaculture (Engelberg, Suisse, 1985) ont passé en revue les observations épidémiologiques sur cette pratique en agriculture et ils ont établi des critères dits d'Engelberg pour la qualité microbiologique des eaux résiduaires *traitées* destinées à l'irrigation. D'après leur recommandations, ces eaux devraient contenir:

- moins de 1 œuf viable de nématode intestinal par litre (en moyenne arithmétique) pour l'irrigation avec ou sans limitation;
- moins de 1 000 coliformes fécaux pour 100 millilitres (en moyenne géométrique) pour l'irrigation sans limitation.

L'irrigation sans limitation concerne les arbres, le fourrage et les plantes industrielles, les arbres fruitiers et les pâturages, tandis que l'irrigation avec limitation concerne les plantes comestibles, les terrains de sport et les parcs publics.

Les critères ci-dessus sont également applicables en agriculture lorsqu'on utilise les excréta, par exemple sous forme de gadoues liquides, comme engrais pendant la période de croissance végétale.

La valeur recommandée pour les œufs de nématodes intestinaux vise à protéger la santé des ouvriers agricoles comme celle des consommateurs et elle suppose que les œufs soient éliminés des eaux résiduaires dans une forte proportion (plus de 99%). Le critère pour les coliformes fécaux est moins exigeant que dans les recommandations antérieures, mais il est conforme aux normes actuelles en vigueur pour les eaux de baignade, par exemple, et suffit largement à protéger la santé du consommateur. Des effluents conformes à ces deux critères peuvent être produits, de façon simple et fiable, par passage dans une série bien conçue de bassins de stabilisation.

Des recommandations sur la qualité microbiologique des excréta et des eaux résiduaires traités destinés à être utilisés en aquaculture ont été formulées lors de la seconde réunion organisée à Adelboden (Suisse), en juin 1987. Il a été recommandé que le nombre d'œufs viables de trématodes soit égal à zéro par litre ou par kilogramme (en moyenne arithmétique) et que le nombre de coliformes fécaux soit inférieur à 10 000 pour 100 millilitres ou 100 grammes (en moyenne géométrique). Le critère extrêmement rigoureux fixé pour les trématodes est indispensable car ces agents pathogènes prolifèrent chez leur premier hôte aquatique intermédiaire. Le critère recommandé pour les coliformes fécaux implique une réduction de 90% du nombre de ces bactéries dans les bassins, de façon que les poissons et les plantes aquatiques comestibles ne soient pas exposés à plus de 1 000 coliformes fécaux pour 100 millilitres.

## Aspects socioculturels

Les comportements humains jouent un rôle décisif dans la transmission des maladies liées aux excréta. La possibilité, sur le plan social, de faire évoluer certains comportements en vue d'utiliser les excréta ou les eaux résiduaires, ou de réduire la transmission des maladies lorsque cette pratique est déjà en vigueur, ne peut être appréciée que si l'on connaît au préalable la signification culturelle de pratiques qui ont apparemment la préférence de la société alors qu'elles facilitent la transmission de maladies. Les croyances culturelles sont si variables dans les différentes régions du monde qu'il n'est pas question de tenir pour acquis que le mode d'utilisation des excréta ou des eaux résiduaires dans telle ou telle région soit directement transposable ailleurs. Une évaluation approfondie du contexte socioculturel local est toujours indispensable au stade de la planification, faute de quoi le projet est voué à l'échec.

## Aspects écologiques

Bien planifiée et correctement gérée, l'utilisation des excreta et des eaux résiduaires peut avoir des répercussions favorables sur l'environnement, tout en augmentant les rendements en agriculture et en aquaculture. Les améliorations d'ordre écologique découlent de plusieurs facteurs, énumérées ci-dessous :

- Suppression de la pollution des eaux superficielles résultant du déversement, dans les cours d'eau ou les lacs, des eaux résiduaires inutilisées. L'utilisation de ces eaux permet d'éviter des problèmes importants de pollution, tels que l'appauvrissement en oxygène dissous, l'eutrophisation, la formation de mousses et la mort des poissons.
- Préservation ou utilisation plus rationnelle des ressources en eau non polluée, spécialement dans les régions arides ou semi-arides — l'eau non polluée servant à l'approvisionnement des villes et les eaux résiduaires étant réservées à l'agriculture.
- Diminution des besoins d'engrais artificiels et, parallèlement, réduction de la consommation d'énergie et de la pollution industrielle dans d'autres endroits.
- Préservation du sol grâce à la constitution d'une couche d'humus qui protège le sol de l'érosion.
- Lutte contre la désertification et récupération de zones désertiques grâce à l'irrigation et à la fertilisation de zones-tampons plantées d'arbres.
- Amélioration du cadre urbain grâce à l'irrigation et à la fertilisation d'espaces verts pour le plaisir des yeux et les activités récréatives.

L'utilisation d'excreta et d'eaux résiduaires en agriculture présente *a priori* l'inconvénient d'entraîner une pollution du sol et des eaux souterraines; mais il est possible de réduire cet inconvénient au minimum par une planification scientifique et une gestion efficace des régimes d'irrigation et de fertilisation.

## Solutions techniques pour la protection de la santé

Les mesures de protection peuvent être regroupées sous quatre rubriques principales :

- traitement des déchets;
- limitation de l'utilisation des excreta et des eaux résiduaires à certaines cultures;
- méthodes d'épandage des déchets;
- limitation de l'exposition humaine.

Souvent, il est bon d'associer plusieurs méthodes. Les facteurs techniques à prendre en considération dans chaque cas sont envisagés ci-dessous.

### Traitement des déchets

La meilleure façon d'exprimer le taux d'élimination des agents pathogènes par un procédé de traitement des déchets consiste à utiliser les logarithmes (de base 10)\* Les critères de qualité d'Engelberg exigent, pour l'irrigation sans limitation, une réduction d'au moins  $4 \log_{10}$  pour la charge bactérienne et de  $3 \log_{10}$  pour les œufs d'helminthe. L'élimination des seuls œufs d'helminthes suffit à assurer la protection du personnel d'exploitation agricole. On peut sans doute se contenter d'un taux d'élimination moins élevé lorsqu'on envisage d'autres mesures de protection sanitaire ou que d'autres améliorations de la qualité interviennent après ce traitement. C'est le cas, par exemple, s'il y a dilution dans des eaux naturelles, séjour prolongé ou transport sur une longue distance dans un cours d'eau ou un canal.

Sans désinfection supplémentaire, les procédés classiques (simple sédimentation, procédé des boues activées, biofiltration, bassin d'oxygénation et fossés d'oxydation) ne fournissent pas un effluent qui satisfasse au critère d'Engelberg recommandé pour l'irrigation sans limitation. De plus, les systèmes classiques de traitement des eaux résiduaires sont en général impuissants à éliminer les œufs d'helminthes.

\* Par exemple, une réduction de  $4 \log_{10}$  correspond à une réduction dans la proportion de 1 à 10 000, puisque  $4 = \log_{10} 10^4 = \log_{10} 10\ 000$ .

Les **bassins de stabilisation** constituent généralement la méthode de choix pour le traitement des eaux résiduaires dans les climats chauds. Une série de bassins assurant une durée de rétention totale de l'ordre de 11 jours permet, si elle est bien conçue, d'éliminer suffisamment d'helminthes; selon la température, il faut environ deux fois plus longtemps pour que la recommandation concernant la charge bactérienne soit satisfaite. La fiabilité de cette méthode en vue d'obtenir une qualité conforme aux recommandations d'Engelberg ne constitue qu'un de ses nombreux avantages; on peut également citer son faible coût et sa simplicité de fonctionnement. Le seul inconvénient des réseaux de bassins est qu'ils exigent une superficie relativement étendue.

La **désinfection** — généralement par chloration — des effluents bruts n'est jamais complète en pratique, mais cette méthode réduit le nombre de bactéries excrétées contenues dans les effluents à la sortie d'une installation classique de traitement. Mais il est fort difficile de maintenir le rendement de la désinfection à un niveau élevé, uniforme et prévisible, sans compter que la chloration est à peu près sans action sur les œufs d'helminthe.

Un autre problème tient au coût du chlore. Un type de traitement mieux approprié consiste à ajouter à la sortie d'une installation de traitement classique, un ou plusieurs bassins en série. L'adjonction de bassins de finissage est une méthode adaptée pour améliorer l'efficacité d'une station existante de traitement des eaux résiduaires.

Le **traitement des excreta** est inutile quand l'épandage des excreta sur le sol se fait par injection dans la couche superficielle ou déversement dans des tranchées, avant le début de la période de végétation. Pour atteindre le critère de qualité recommandé pour les helminthes, il faut laisser séjourner les excreta au moins un an à la température ambiante; une autre solution consiste à effectuer directement le traitement des gadoues et des boues de fosse septique dans des bassins de stabilisation.

**Traitement thermique des excreta.** Deux méthodes de traitement des excreta à haute température permettent de réduire la durée de rétention nécessaire pour satisfaire au critère d'Engelberg (au moins 12 mois):

- digestion thermophile en discontinu à 50° pendant 13 jours;
- compostage avec aération forcée.

Du point de vue agricole, le compostage a plusieurs avantages.

---

## **Limitation de la méthode à certaines cultures**

**Agriculture.** Quand le critère d'Engelberg n'est qu'imparfaitement satisfait, on peut encore utiliser la méthode pour la culture de certaines plantes, sans risques pour le consommateur. Les plantes cultivées peuvent être classées en quelques grandes catégories selon l'ampleur des mesures de protection de la santé:

**Catégorie A — Protection nécessaire uniquement pour le personnel d'exploitation agricole.** Se rangent dans cette catégorie des cultures industrielles comme celles du coton, du sisal et des céréales, ainsi que l'exploitation forestière et les plantes vivrières destinées à la conserve.

**Catégorie B — Mesures complémentaires éventuellement nécessaires.** Cette catégorie englobe les pâturages, le fourrage vert, l'arboriculture, ainsi que les fruits et légumes qui sont pelés ou cuits avant d'être consommés.

**Catégorie C — Respect strict des critères d'Engelberg pour l'irrigation sans limitation.** Ce traitement rigoureux est nécessaire pour les légumes frais, les fruits irrigués par aspersion, ainsi que les parcs, les gazons et les parcours de golf.

Quand l'irrigation est limitée à certaines cultures et sous certaines conditions, comme il est prévu pour la catégorie A, on parle plus brièvement d'irrigation avec limitation.

Cette limitation assure la protection des consommateurs, mais non celle des ouvriers agricoles et de leurs familles. Elle doit être complétée par d'autres mesures, par exemple un traitement partiel des déchets, leur épandage contrôlé ou la limitation de l'exposition humaine. Dans la plupart des situations, un traitement partiel conforme au critère de qualité d'Engelberg pour les helminthes assure en principe la protection de la santé du personnel d'exploitation et il est moins onéreux qu'un traitement complet.

La limitation à certaines cultures est une méthode qui ne soulève aucune impossibilité et qui est facilitée dans diverses circonstances, notamment dans les cas suivants:

- respect spontané de la loi par la société ou répression rigoureuse des infractions;
- il existe un organisme public qui contrôle l'utilisation des déchets;
- le projet d'irrigation relève d'une direction centrale dotée de pouvoirs étendus;

- les plantes dont la culture est autorisée avec cette méthode d'irrigation bénéficient d'une demande suffisante et atteignent un cours raisonnable;
- le marché n'exerce qu'une faible pression en faveur des plantes exclues (par exemple celles de la catégorie C).

## **Epannage des eaux résiduaires et des excreta**

**Eaux résiduaires en agriculture.** Les eaux d'irrigation, y compris les eaux résiduaires traitées, peuvent être réparties sur le sol de cinq façons :

- par submersion (irrigation par calants), qui assure l'humidification de presque toute la surface du sol;
- par infiltration «à la raie», ce qui limite l'humidification à la couche superficielle;
- par aspersion, ce qui assure une humidification du sol analogue à celle qui résulte de la pluie;
- par irrigation souterraine, procédé dans lequel la surface reste peu humide tandis que le sous-sol est saturé;
- par irrigation localisée (par ruissellement, goutte-à-goutte, au moyen de tuyaux de refoulement, etc.), procédé dans lequel l'eau est versée au pied de chaque plante à un débit réglable.

La submersion est la technique qui exige le moins d'investissements mais qui fait probablement courir le plus grand risque aux travailleurs agricoles.

Quand l'eau ne répond pas aux critères de qualité bactériologique d'Engelberg mais qu'on en a besoin pour des récoltes de la catégorie B, l'irrigation par aspersion est à exclure sauf pour les pâturages ou les fourrages, l'irrigation par calants étant à éviter pour les légumes.

L'irrigation souterraine apporte le maximum de sécurité sur le plan sanitaire, outre qu'elle permet une utilisation plus efficace de l'eau et donne souvent des rendements plus élevés. Mais c'est une technique coûteuse qui nécessite un traitement extrêmement fiable de l'eau utilisée si l'on veut éviter que les petits orifices (éjecteurs) par lesquels l'eau se répand lentement dans le sol ne se colmatent. Quand à l'irrigation par tuyaux de refoulement, mise au point pour l'irrigation localisée des arbres, elle évite d'avoir besoin d'éjecteurs pour régulariser l'écoulement au niveau de chaque arbre.

**Excreta en agriculture.** L'utilisation d'excreta non traités ou insuffisamment traités n'est possible que par épandage sur le sol, selon deux techniques: enfouissement dans des tranchées recouvertes avant le début de la période de végétation ou injection souterraine au moyen de dispositifs spéciaux. Les gadoues dont la qualité correspond seulement à la valeur recommandée pour les helminthes peuvent faire courir aux ouvriers agricoles un risque plus élevé que l'irrigation réglementée au moyen d'eaux résiduaires; seule une limitation de l'exposition permet de réduire ce risque au minimum.

**Aquaculture.** En faisant séjourner les poissons dans une eau pure pendant deux ou trois semaines au moins avant leur capture, on peut faire disparaître les odeurs résiduelles qui risqueraient de rebuter le consommateur et réduire la contamination par des micro-organismes fécaux. Mais, cette dépuración ne garantit pas une élimination totale des agents pathogènes présents dans les tissus et l'appareil digestif des poissons, sauf si la contamination est très faible.

### **Limitation de l'exposition humaine**

**Agriculture.** Il existe quatre catégories de personnes sur qui l'utilisation agricole des eaux résiduaires et des excreta fait peser un risque potentiel:

- ouvriers agricoles travaillant dans les champs et membres de leur famille;
- manutentionnaires et manipulateurs des produits de la récolte;
- consommateurs (de plantes cultivées, de viande et de lait);
- personnes vivant à proximité des champs.

Le risque d'ankylostomiase chez le personnel d'exploitation agricole peut être réduit par le port permanent de chaussures appropriées pendant les travaux des champs, mais cette solution est parfois très difficile à imposer.

S'il n'est pas possible de vacciner contre les helminthiases ni contre la plupart des maladies diarrhéiques, il n'est peut-être pas inutile, en revanche, de vacciner les groupes très exposés contre la typhoïde et l'hépatite A. Une protection supplémentaire est possible par la mise à disposition des moyens médicaux convenables, par une chimiothérapie contre les nématodoses massives de l'enfance et par le traite-

ment des sujets anémiés. La chimiothérapie et la vaccination ne peuvent pas être considérées comme suffisantes en soi mais elles peuvent être valables à titre de mesure palliative provisoire.

Les risques pour le consommateur peuvent être réduits par une cuisson à cœur et par la pratique d'une hygiène rigoureuse. On peut limiter la transmission du ténia par inspection des viandes.

Les résidents doivent être pleinement informés de l'emplacement de tous les champs où l'on utilise des déchets d'origine humaine de façon qu'ils puissent se tenir à l'écart, ainsi que leurs enfants. Il ne semble pas que les personnes qui habitent à proximité de champs irrigués au moyen d'eaux résiduaires courent un risque notable du fait de l'irrigation par aspersion, à condition toutefois que les asperseurs soient installés en retrait d'au moins 50-100 m par rapport aux habitations et voies de communication.

**Aquaculture.** La meilleure méthode de lutte contre la schistosomiase consiste dans le traitement des malades et dans la destruction des gastéropodes. Une chimiothérapie régulière serait bénéfique dans les régions d'endémie. Les résidents doivent être informés de l'existence de bassins où l'on utilise des déchets comme engrais. Un assainissement correct et un approvisionnement en eau salubre contribue de façon importante à limiter l'exposition humaine.

## **Planification et mise en œuvre**

### **Planification des ressources**

L'utilisation d'eaux résiduaires et d'excreta relève de plusieurs ministères ou organismes officiels. La participation active des ministères de la santé et de l'agriculture est particulièrement nécessaire. En général, il est bon de créer un comité inter-organisations ou, éventuellement, une organisation para-étatique distincte, responsables de ce secteur et ayant pour première tâche, dans le cadre de la planification des ressources hydriques, d'établir un plan national pour la réutilisation des déchets. En principe, ce plan doit prévoir l'amélioration des pratiques existantes en matière de réutilisation et la mise en œuvre de nouveaux projets.

### **Amélioration des pratiques existantes**

L'utilisation de déchets d'origine humaine pour la production de plantes et de poissons constitue souvent une pratique illicite, qui n'a reçu aucun agrément officiel des autorités sanitaires. Interdire cette prati-

que n'a guère de chances d'en réduire la fréquence ni d'atténuer les dangers qui en découlent pour la santé publique —, l'interdiction pouvant même rendre encore plus difficiles la surveillance et la réglementation. Il y a davantage à attendre d'un soutien destiné à améliorer les pratiques en usage, non seulement pour réduire au minimum les dangers pour la santé mais aussi pour augmenter la productivité.

Un minimum de réglementation officielle est généralement nécessaire, encore qu'il soit plus facile de formuler un règlement que de le faire respecter. Les mesures visant à protéger la santé publique sont particulièrement difficiles à mettre en œuvre quand il existe de nombreuses sources individuelles ou propriétaires de déchets. Souvent, les mesures nécessaires pour faire tomber l'utilisation des déchets sous le coup d'une réglementation générale impliquent la création de nouveaux systèmes.

La première chose à faire, lorsqu'on essaie d'améliorer des pratiques existantes, est de tout mettre en œuvre pour les recenser, tout en organisant avec tact des entretiens informels avec les agriculteurs, les fonctionnaires locaux et les organismes locaux concernés. Lorsqu'une pratique en usage est en contravention avec la réglementation, il importe de chercher à savoir pourquoi cette réglementation n'est pas appliquée: les raisons possibles vont de l'existence de normes inappropriées à l'absence d'un arsenal répressif.

## Les solutions possibles

Les sections ci-dessous sont consacrées à l'examen des diverses solutions du point de vue de leur faisabilité, de leur planification et de leur mise en œuvre.

### a) Traitement

**Eaux résiduaires.** Le traitement est difficile à mettre en œuvre quand ces eaux ont des origines diverses, par exemple lorsqu'il s'agit de l'effluent d'un ensemble de fosses septiques. Une méthode peut consister à prendre des mesures contre les producteurs d'eaux résiduaires, pour empêcher la pollution de l'environnement qui en résulte. Dans d'autres cas, la seule solution consiste à construire un réseau d'égout et des installations de traitement des effluents.

**Excreta.** Le traitement est beaucoup plus facile à mettre en œuvre lorsqu'un seul et même organisme, par exemple une municipalité, assure la collecte ou au moins le traitement des excreta. La création de parcelles locales expérimentales peut persuader les divers agriculteurs de traiter les excreta en leur apportant la preuve que les rende-

ments sont augmentés par cette technique. Il s'agit d'une tâche qui relève de la vulgarisation agricole.

**Aquaculture.** Un type de traitement possible dans le cas de l'aquaculture consiste à placer plusieurs bassins en série (ou à subdiviser un seul bassin en plusieurs compartiments reliés les uns aux autres en série) et à s'abstenir de récolter les produits dans le premier bassin. Cette solution nécessite parfois des accords de coopération entre les propriétaires des différents bassins.

### **b) Limitation à certaines cultures**

Il peut être difficile, mais non impossible, d'interdire l'emploi de cette méthode d'irrigation pour certaines cultures, lorsqu'on est en présence d'un grand nombre de petits exploitants. Dans certains pays, les mécanismes de planification agricole en place permettent de réglementer de façon rigoureuse toutes les cultures pratiquées. Mais quand il n'existe pas de précédents locaux, la possibilité d'imposer des limitations doit d'abord être expérimentée dans une zone déterminée. Des dispositions doivent être prises pour commercialiser les cultures autorisées et faciliter l'accès aux organismes de crédit agricole.

### **c) Epannage**

Il est particulièrement nécessaire de modifier la méthode d'irrigation, afin de réduire le risque pour la santé, quand la pratique actuelle consiste dans l'irrigation par submersion. Les agriculteurs peuvent avoir besoin d'une aide pour préparer le sol afin de rendre possible le recours à une autre méthode. Deux arguments peuvent être mis en avant pour les inciter à changer de méthode: l'efficacité accrue des autres techniques d'irrigation et la réduction de la nuisance constituée par les moustiques. Quand le service de vulgarisation agricole n'arrive pas à promouvoir le recours à des méthodes d'épannage hygiéniques, ce résultat peut parfois être obtenu par l'organisme qui contrôle la distribution des déchets.

### **d) Limitation de l'exposition humaine**

Les mesures visant à réduire l'exposition aux maladies diarrhéiques en général et à faciliter le traitement des malades constituent un aspect bien connu des soins de santé primaires. Des mesures d'intérêt évident consistent à assurer un approvisionnement suffisant en eau et la

mise en place d'installations d'assainissement. Des précautions s'imposent pour que les déchets ne risquent pas de contaminer les sources voisines d'eau potable.

Lorsqu'ils emploient des salariés pour le travail aux champs ou dans les étangs, les employeurs ont des responsabilités qui sont souvent stipulées dans la législation en vigueur concernant la médecine du travail. Une éducation en matière d'hygiène est également nécessaire pour les manutentionnaires et pour les consommateurs; les marchés constituent parfois l'endroit idéal pour conseiller les consommateurs sur ce point.

Dès lors que les précautions nécessaires ont été expliquées, les résidents sont les mieux placés pour veiller à ce que leur santé ne soit pas menacée. A partir d'une commission d'hygiène où siègent des résidents, on peut organiser une campagne d'éducation pour la santé ou la surveillance de l'utilisation des déchets.

Le traitement des helminthiases intestinales chez les travailleurs agricoles et leur famille est relativement facile à réaliser dans le cadre d'un organisme officiel chargé de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires, encore qu'il nécessite parfois des agents de santé supplémentaires. Lorsqu'on utilise des eaux résiduaires dans des exploitations nombreuses ou petites, le recensement et le traitement des personnes exposées peuvent devenir fort onéreux, de sorte qu'une chimiothérapie de masse devient alors préférable au traitement sélectif des sujets parasités.

## **Nouveaux systèmes**

En général, il faut donner la priorité à l'amélioration des systèmes existants — dans le sens d'une productivité accrue ou d'une réduction des dangers pour la santé — sur la mise en place de nouveaux systèmes. L'attention doit porter non seulement sur les perfectionnements techniques nécessaires mais aussi sur les progrès à réaliser en matière de gestion et sur les améliorations au niveau du fonctionnement et de l'entretien.

Un projet pilote constitue une nécessité particulière dans les pays où l'on n'a guère l'expérience de l'utilisation planifiée des excréta ou des eaux résiduaires. Le problème de la protection sanitaire n'est qu'une question parmi d'autres auxquelles il est difficile de répondre sans l'expérience locale que peut apporter un projet pilote. Ce dernier doit fonctionner pendant au moins une période de végétation et peut ensuite être transposé dans un projet de démonstration disposant de moyens pour assurer la formation des opérateurs et des agriculteurs locaux.

## Planification du projet

A de nombreux égards, la planification de l'utilisation des excreta et des eaux résiduaires comporte les mêmes exigences que pour tout autre système d'irrigation et de fertilisation. Pour chaque système, le planificateur doit chercher à maximiser les bénéfices tout en assurant, comme il convient, la protection de la santé et en limitant les coûts au minimum. Pour évaluer les bénéfices, il faut prévoir non seulement les rendements agricoles mais également les coûts. Cela exige une étude de marché préliminaire.

Pour que le plan soit utile, il doit porter sur une certaine durée. Pour les projets d'irrigation, la planification se fait souvent à l'horizon de 20 ans, avec des débuts modestes suivis par une expansion progressive. Les projets concernant les eaux résiduaires sont tributaires de l'évolution qui intervient peu à peu dans la quantité et la qualité des eaux résiduaires disponibles.

La structure organisationnelle d'un système de réutilisation des déchets est déterminée en grande partie par les modalités en vigueur pour l'utilisation des sols et par les institutions en place. Les agriculteurs doivent bénéficier d'un statut qui leur garantisse un droit durable à l'exploitation de leurs terres et à l'utilisation d'eaux résiduaires, spécialement s'ils ont à faire des dépenses d'équipement ou s'ils doivent changer la nature de leurs cultures.

Dans les systèmes importants, la présence de spécialistes de la gestion employés à plein temps est indispensable, de préférence sous la tutelle d'un seul organisme. La délivrance et le renouvellement des autorisations d'utiliser les ressources nécessaires peuvent être subordonnées au respect des exigences de l'assainissement. Il est courant de traiter avec les propriétaires d'exploitations agricoles ou de bassins piscicoles par l'intermédiaire d'associations d'usagers qui ont pour mission de faire appliquer la réglementation exigée pour le renouvellement d'une autorisation.

Les comités ou conseils de gestion conjoints regroupant les représentants de ces associations, à côté d'usagers particulièrement importants, de représentants des organismes chargés de la collecte et de la distribution des déchets et de l'administration sanitaire locale, ont fait la preuve de leur utilité dans de nombreuses circonstances.

Divers services d'aide aux exploitants agricoles peuvent présenter un intérêt sur le plan de la protection de la santé et doivent être pris en compte au stade de la planification. Il s'agit de la fourniture de machines agricoles, de l'octroi de crédits agricoles, de la commercialisation, des soins de santé primaires et de la formation. Souvent, les programmes de formation doivent démarrer avant le début du projet. De même, il faut évaluer les besoins probables en matière de vul-

garisation agricole et prendre des mesures pour que celle-ci soit assurée aux agriculteurs une fois le projet lancé.

## **Législation**

La mise en place ou l'encouragement de nouveaux projets en vue de l'utilisation des eaux résiduaires et des excreta en agriculture ou en aquaculture exigent parfois des mesures législatives. Cinq aspects méritent une attention plus particulière:

- création de nouvelles institutions ou attribution de nouveaux pouvoirs à des organismes existants;
- rôle de l'administration locale et nationale dans le secteur en cause et relations entre ces deux niveaux administratifs;
- droits concernant l'accès aux déchets et leur propriété, notamment réglementation publique de leur utilisation;
- régime foncier;
- législation en matière d'agriculture et de santé publique: normes de qualité imposées aux déchets, limitation de la méthode à certaines cultures, méthodes d'épandage, médecine du travail, hygiène alimentaire, etc.

## **Considérations économiques et financières**

L'évaluation économique vise à établir si un projet est valable; la planification financière s'attache au mode de financement des projets retenus. L'amélioration des pratiques existantes exige aussi une certaine planification financière.

**Évaluation économique.** L'évaluation économique des systèmes d'irrigation au moyen d'eaux résiduaires repose sur leur comparaison avec l'autre solution, c'est-à-dire avec ce qui serait fait en l'absence du système. Dans les coûts des eaux résiduaires, il faut faire entrer le coût du traitement complémentaire éventuellement nécessaire, le coût du transport jusqu'aux champs et le coût de l'épandage sur les cultures. Mais il est essentiel d'en retrancher le coût du système qui devrait être mis en place pour éliminer les eaux résiduaires si le projet n'était pas mis en œuvre.

L'évaluation économique est plus rudimentaire s'agissant de l'utilisation des excreta et des eaux résiduaires en aquaculture car certains des avantages à escompter sont plus difficiles à chiffrer.

**Planification financière.** En principe, la distribution des déchets aux agriculteurs donne lieu à la perception d'une taxe dont le montant doit être fixé au stade de la planification. Un agriculteur ne paie les eaux résiduaires destinées à l'irrigation que si leur coût est inférieur au total du coût de la source d'eau de remplacement la moins chère et de la valeur des nutriments apportés. Dans le cas de l'aquaculture et de celui de l'utilisation des excreta, le prix est généralement établi à partir du coût marginal du traitement et du transport des déchets ou de la valeur des nutriments qu'ils contiennent, selon celui des deux qui est le plus faible.

Il n'est pas toujours possible ni souhaitable de couvrir le coût de la protection de la santé par le prélèvement d'une taxe sur l'utilisation des déchets. Les considérations financières qui interviennent à ce sujet sont exposées ci-dessous pour chacune des quatre catégories de mesures de protection.

- a) **Traitement.** Le coût du traitement est généralement justifié par le souci de limiter la pollution de l'environnement. Mais le traitement des déchets jusqu'à l'obtention d'une qualité convenable pour leur utilisation en agriculture implique parfois des coûts supplémentaires dont certains, il est vrai, peuvent être couverts par la vente des déchets traités. Si l'on incite les agriculteurs à traiter des gadoues ou des eaux résiduaires, ils peuvent avoir besoin de crédits pour financer les constructions nécessaires.
- b) **Limitation à certaines cultures.** Cette limitation peut entraîner une diminution des frais de traitement, mais si des dispositions financières suffisantes ne sont pas prises pour assurer le respect de la réglementation, celle-ci va rester lettre morte.
- c) **Epandage.** La préparation des champs permettant aux agriculteurs d'éviter d'autres frais, le coût peut leur être imputé, comme on le fait pour les autres dépenses d'irrigation. L'irrigation localisée consomme moins d'eau et peut donner de meilleurs rendements, de sorte que, dans certaines circonstances, les agriculteurs sont disposés à se rallier à cette nouvelle méthode.
- d) **Limitation de l'exposition humaine.** En principe, les vêtements protecteurs sont payés par les ouvriers qui les portent ou par leurs employeurs. Normalement, le coût de la chimiothérapie est à la charge des services de santé.

## Surveillance et évaluation

Les mesures de protection sanitaire exigent, pour être durablement efficaces, une surveillance régulière. Il faut prendre des dispositions pour qu'une information en retour soit assurée à ceux qui appliquent les mesures de protection sanitaire et pour imposer l'application de ces mesures quand il y a lieu. Les divers aspects à prendre en considération pour assurer une surveillance et une évaluation régulières sont les suivants:

- **Mise en œuvre des mesures elles-mêmes.** Elle peut être contrôlée au moyen d'enquêtes simples.
- **Qualité des déchets.** Il peut être plus avantageux de surveiller le fonctionnement du système de traitement que de procéder au prélèvement fréquent d'échantillons en vue de leur analyse. Les critères d'Engelberg ne sont pas des normes destinées à la surveillance de la qualité, mais des paramètres applicables, au stade de la planification, à la conception d'un système de traitement. L'absence de moyens de laboratoire qui permettraient des contrôles réguliers de qualité n'est pas une raison suffisante pour exclure l'utilisation des déchets.
- **Qualité des cultures.** La surveillance microbiologique des cultures incombe au ministère de la santé en sa qualité d'instance chargée de faire respecter la réglementation en santé publique.
- **Surveillance des maladies.** Elle doit être axée sur le personnel d'exploitation agricole. Dans n'importe quel système, il faut au moins procéder à des examens coprologiques réguliers sur un échantillon de personnel, à la recherche de parasites intestinaux. Quand la typhoïde est endémique, on peut procéder simultanément à une enquête sérologique.

# 1

## Introduction

### I.1. Objectifs

L'objectif général du présent Guide est d'encourager l'utilisation des eaux résiduaires et des excréta en agriculture et aquaculture dans des conditions propres à sauvegarder la santé du personnel et du public en général. Dans ce contexte, on entend par «eaux résiduaires» les eaux usées domestiques et les effluents municipaux lorsqu'ils ne contiennent pas d'effluents industriels en quantités appréciables; par «excreta», on entend non seulement les gadoues mais aussi les produits dérivés des excréta, par exemple les boues, notamment celles des fosses septiques.<sup>1</sup> En règle générale, la protection de la santé exige que ces déchets subissent un minimum de traitement pour en éliminer les agents pathogènes. D'autres mesures visant à protéger la santé sont envisagées ici, à savoir les restrictions imposées à l'emploi des eaux résiduaires et des excréta en agriculture, les techniques d'épandage des déchets et les dispositions en vue de limiter l'exposition humaine.

Ce Guide s'adresse principalement aux personnes qui occupent un poste de responsabilité dans les divers secteurs concernés par la réutilisation des déchets, à savoir la planification, la santé publique, le génie sanitaire, les ressources hydriques, ainsi que l'agriculture et les pêcheries. Les recommandations formulées visent à prévenir la propagation des maladies transmissibles, tout en permettant l'économie des ressources et le recyclage des déchets dans des conditions optimales. L'accent est donc mis sur les mesures visant à limiter la contamination microbienne plutôt qu'à éviter tout risque pour la santé du fait de la pollution chimique, phénomène qui n'a qu'une importance mineure lors de la réutilisation des déchets domestiques et qui, de toute façon, est traité de manière appropriée dans d'autres publications.<sup>2</sup> De même, les aspects qui ne concernent que l'agriculture ne sont envisagés ici que pour autant qu'ils intéressent la protection de la santé.

Des observations épidémiologiques récentes montrent que les normes appliquées autrefois à la réutilisation des déchets dans un souci d'hygiène étaient inutilement rigoureuses car elles reposaient seule-

---

<sup>1</sup> Pour la définition de ce terme et des autres termes techniques, se reporter au glossaire, page 202.

<sup>2</sup> Voir bibliographie, page 201.

ment sur la possibilité de survie des agents pathogènes. Lors d'une réunion organisée à Engelberg (Suisse), en 1985, à l'initiative de l'Organisation mondiale de la Santé, de la Banque mondiale et du Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, les participants — ingénieurs sanitaires, épidémiologistes et sociologues — ont proposé une approche plus réaliste de l'utilisation des eaux résiduaires et des excreta traités. Ils s'inspiraient pour ce faire des observations épidémiologiques les plus récentes et les plus probantes, qui ont fait l'objet d'une mise au point de Shuval & al. (1986) ainsi que de Blum & Feachem (1985). Les recommandations formulées dans le rapport d'Engelberg (IRCWD, 1985) ont servi de base à l'approche générale adoptée dans le présent Guide en vue de protéger la santé publique.

## 1.2 Plan de l'ouvrage

Les sections 2 et 3 ci-après constituent l'historique de la réutilisation et de la mise à profit des déchets et donnent en outre quelques exemples des pratiques actuelles dans diverses régions du monde. Une introduction aux aspects touchant à la santé publique, notamment les implications pratiques des récents progrès épidémiologiques, fait l'objet de la section 4, tandis que les facteurs socioculturels sont abordés à la section 5. La section 6 est consacrée à la protection et à l'amélioration de l'environnement grâce à la réutilisation des déchets.

Les mesures utilisables en pratique pour assurer la protection de la santé publique font l'objet d'un examen approfondi à la section 7, tandis que la section 8 traite des aspects institutionnels, juridiques et financiers de la planification et de la mise en œuvre des projets, en indiquant les diverses mesures nécessaires pour faire en sorte que les déchets humains soient utilisés en agriculture et aquaculture avec un maximum de profit, mais sans menacer la santé publique.

## 2

# Mise en valeur des déchets d'origine humaine

Dans de nombreuses régions du monde, les déchets d'origine humaine sont considérés comme une ressource qui est largement mise à profit à diverses fins (voir tableau 2.1). Dans le présent Guide, on a insisté sur les trois pratiques suivantes, car elles sont les plus fréquentes :

- utilisation des eaux résiduaires en agriculture (irrigation des cultures);
- utilisation des excréta en agriculture (fertilisation du sol);
- utilisation des eaux résiduaires et des excréta en aquaculture (pisciculture, production de macrophytes aquatiques).

### 2.1 Utilisation des eaux résiduaires en agriculture

Après l'introduction, au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, des réseaux de transport hydrique des eaux résiduaires domestiques, de nombreuses grandes villes d'Amérique du Nord et d'Europe ont adopté l'irrigation des cultures comme moyen d'éliminer leurs eaux résiduaires. Des exploitations agricoles utilisant cette pratique ont été créées au Royaume-Uni dès 1865, puis aux Etats-Unis d'Amérique en 1871, en France en 1872, en Allemagne en 1876, en Inde en 1877, en Australie en 1893 et au Mexique en 1904. Dans la plupart de ces pays, la raison essentielle qui poussait à utiliser les eaux résiduaires en agriculture était d'empêcher la pollution des cours d'eau et non pas d'améliorer la production agricole; au Royaume-Uni, le mot d'ordre était le suivant: « les eaux usées pour la terre, la pluie pour les rivières ». Mais, à mesure que les villes ont pris de l'extension et qu'une proportion plus élevée de la population a bénéficié du tout-à-l'égout, les superficies nécessaires pour absorber ce volume d'eaux usées en agriculture sont devenues trop grandes. La pratique est devenue moins populaire et, avec la mise au point au cours des deux premières décennies du siècle, des procédés modernes de traitement des eaux résiduaires tels que la bio-filtration et les boues activées, elle a complètement disparu dans de nombreux pays peu après la Première Guerre mondiale, du fait de

**Tableau 2.1 Exemples de méthodes de réutilisation des déchets d'origine humaine**

<b>Méthode de réutilisation</b>	<b>Unité sociale responsable</b>	<b>Exemples</b>
Fertilisation du sol au moyen de gadoues non traitées	Famille ou collectivité	Chine, Inde, Japon, Thaïlande
Ramassage des gadoues et compostage en vue de leur utilisation en agriculture	Collectivité ou administration locale	Chine, Inde
Utilisation des gadoues pour la nourriture des animaux	Famille	Afrique, Mélanésie
Utilisation de latrines à compost	Famille	Guatemala, République-Unie de Tanzanie, Viet Nam
Production de biogaz	Famille ou collectivité	Chine, Inde
Engraissement des bassins de pisciculture au moyen de gadoues traitées ou non	Famille ou collectivité	Chine, Indonésie, Malaisie
Pisciculture dans les bassins de stabilisation	Famille (pratique illégale) ou exploitant commercialisant sa production	Inde, Israël, Kenya
Production de plantes aquatiques dans des bassins	Famille, collectivité ou administration locale	Asie du Sud-Est, Viet Nam
Epanchage des eaux résiduaires en agriculture	Administration locale ou exploitant commercialisant sa production	Voir tableau 2.2.
Epanchage à usage agricole de boues	Administration locale ou exploitant commercialisant sa production	Etats-Unis d'Amérique, Kenya, Royaume-Uni
Irrigation au moyen des effluents des bassins de stabilisation	Administration locale ou exploitant commercialisant sa production	Inde, Israël, Pérou
Production d'algues dans des bassins de stabilisation	Administration locale	Israël, Japon, Mexique

Source : Strauss (1985)

la possibilité de déverser désormais les eaux résiduaires dans des eaux superficielles sans provoquer de pollution appréciable. Comme exceptions notables à cette tendance, on peut citer le cas des exploitations agricoles de Werribee (Melbourne, Australie) et de Mexico, où l'on

**Tableau 2.2 Statistiques mondiales sur l'emploi des eaux résiduaires pour l'irrigation**

Pays et villes	Superficie irriguée (ha)
Afrique du Sud, Johannesburg	1 800
Allemagne (Rép. féd. d'), Brunswick	3 000
Autres villes	25 000
Arabie Saoudite, Ryad	2 850
Argentine, Mendoza	3 700
Australie, Melbourne	10 000
Bahreïn, Tubli	800
Chili, Santiago	16 000
Chine, ensemble des villes	1 330 000
Etats-Unis d'Amérique, Chandler, Arizona	2 800
Bakersfield, Californie	2 250
Fresno, Californie	1 625
Lubbock, Texas	3 000
Muskegon, Michigan	2 200
Santa Rosa, Californie	1 600
Inde, Calcutta	12 500
Ensemble des villes	73 000
Israël, plusieurs villes	8 800
Koweït, plusieurs villes <sup>a</sup>	12 000
Mexique, Mexico	90 000
Ensemble des villes <sup>a</sup>	250 000
Perou, Lima <sup>a</sup>	6 800
Soudan, Khartoum	2 800
Tunisie, Tunis <sup>a</sup>	4 450
Autres villes <sup>a</sup>	2 900

<sup>a</sup> Compte tenu du développement prévu pour la réutilisation des eaux résiduaires.

Source : Bartone & Arlosoroff (1987).

a continué d'utiliser des eaux résiduaires pour l'irrigation et où le système fonctionne encore, quelque 80-90 ans après sa création. En revanche, une réutilisation indirecte — à savoir l'utilisation d'eau puisée dans des cours d'eau où l'on a déversé des effluents bruts — est pratiquée partout dans le monde, et c'est à l'heure actuelle le mode d'utilisation le plus courant des effluents, non seulement pour l'irrigation mais aussi, après un traitement approprié, pour l'approvisionnement en eau potable.

Au cours des deux dernières décennies, l'utilisation des eaux résiduaires pour l'irrigation (voir tableau 2.2.) s'est beaucoup développée, spécialement dans les régions semi-arides des pays développés ou de pays en développement (voir figure 2.1). Cette évolution constitue la résultante de plusieurs facteurs:

- la rareté d'autres sources pour l'irrigation;

**Fig. 2.1. Irrigation au moyen d'eaux résiduaires traitées en Arabie Saoudite**  
Les champs irrigués se détachent nettement, par contraste avec le terrain naturel aride.



- le coût élevé des engrais artificiels;
- la preuve que les dangers pour la santé et les dégâts pour le sol sont minimes moyennant certaines précautions;
- le coût élevé des stations perfectionnées de traitement des eaux résiduaires;
- l'acceptation de cette pratique sur le plan socioculturel;
- la reconnaissance de la valeur de cette pratique par les responsables de la planification des ressources hydriques.

Des eaux-vannes sont produites par les ménages qui ont l'eau courante et utilisent des toilettes à chasse d'eau raccordées à un réseau d'égouts où se déversent toutes les autres eaux usées domestiques (ou

## Encadré 2.1 De meilleurs rendements grâce à l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires

Selon de nombreux rapports en provenance du monde entier, les rendements agricoles sont notablement accrus par l'irrigation au moyen d'eaux usées. En Inde, par exemple, les expériences prolongées menées sur le terrain par le National Environmental Engineering Research Institute de Nagpur ont montré qu'une irrigation d'intensité moyenne au moyen d'eaux résiduaires fournit des rendements plus élevés qu'une irrigation au moyen d'eau non polluée additionnée d'azote, de phosphore et de potassium (NPTK) aux doses habituelles, comme on le constate dans le tableau ci-dessous.

Eau d'irrigation	Rendement agricole (tonnes par hectare et par an)				
	Blé (8) <sup>a</sup>	Haricot moong (5)	Riz (7)	Pomme de terre (4)	Coton (3)
Eaux résiduaires brutes	3,34	0,90	2,97	23,11	2,56
Eaux résiduaires décantées	3,45	0,87	2,94	20,78	2,30
Effluents de bassins de stabilisation	3,45	0,78	2,98	22,31	2,41
Eau non polluée + NPK	2,70	0,72	2,03	17,16	1,70

<sup>a</sup> Nombre d'années de récolte utilisé pour calculer le rendement moyen

Source : Shende (1985)

ménagères). Dans l'ensemble du monde en développement, rares sont les ménages producteurs d'effluents, car un réseau d'égout constitue une technique d'assainissement trop coûteuse ; la majorité d'entre eux produisent séparément excreta (gadoues) et eaux résiduaires. En revanche, dans de nombreuses agglomérations, un nombre suffisant de ménages sont raccordés à un réseau d'égout pour que l'utilisation des effluents en agriculture constitue une solution attrayante sur le plan économique : les cultures sont à la fois irriguées et fertilisées par l'eau et les nutriments que contiennent les effluents. Du même coup, on évite le gâchis que constituerait la mise au rebut de ces ressources rares par des pratiques qui entraînent souvent une pollution importante de l'environnement. Moyennant une gestion convenable, les rendements agricoles sont accrus (voir encadré 2.1) sans aucun effet nocif pour la santé. Avec les pratiques actuelles, l'utilisation d'eaux résiduaires pour l'irrigation entraîne parfois un excédent de maladies associées aux excreta chez les ouvriers agricoles et chez les consommateurs, mais cela est dû uniquement à l'utilisation de techniques inappropriées.

On sait aujourd'hui concevoir et faire fonctionner des systèmes d'utilisation des eaux résiduaires qui évitent la transmission d'infections associées aux excréta, de sorte que les risques potentiels pour la santé, qu'on peut désormais totalement éviter (voir section 4), ne doivent plus être considérés un argument pour renoncer à poursuivre et développer une pratique très bénéfique par ailleurs.

On comprendra que certains gouvernements aient hésité à encourager activement l'utilisation des eaux résiduaires, d'autant que, jusqu'à une époque récente, il n'existait pas d'évaluation réaliste des dangers de cette pratique pour la santé ni de directives rationnelles auxquelles se référer pour le traitement des eaux résiduaires avant utilisation. Mais les utilisateurs effectifs — agriculteurs et maraîchers — n'ont pas fait montre de la même prudence, de sorte que, dans l'ensemble du monde en développement, on se sert couramment d'eaux résiduaires pour l'irrigation en agriculture et en horticulture. En réalité, dans de nombreux régions, on attache un tel prix aux eaux résiduaires que les égouts sont éventrés pour permettre le détournement des eaux usées vers les champs. Cette pratique, qui n'a rien d'exceptionnel mais est évidemment illégale et dangereuse montre sans ambiguïté l'intérêt attaché à l'utilisation de ces eaux. Il est douteux qu'on puisse mettre fin à de telles pratiques tant que les pouvoirs publics n'auront pas élaboré et promulgué une politique nationale de l'utilisation des eaux résiduaires. Seules des mesures convenables visant à réduire au minimum les dangers pour la santé et assurer une distribution équitable des eaux résiduaires en vue de l'irrigation, peuvent permettre de tirer le meilleur parti possible de cette pratique sur le plan économique, tout en supprimant les dangers qu'elle fait effectivement peser sur la santé.

## Eau

Les eaux résiduaires sont composées de 99,9% d'eau et de 0,1% d'autres matières (matières solides en suspension, à l'état colloïdal ou en solution). Dans les régions arides et semi-arides, les ressources hydriques sont si rares que leur répartition entre la demande urbaine (domestique et industrielle) et la demande agricole donne lieu à de graves conflits. En général, le seul moyen d'y mettre fin consiste à utiliser les eaux résiduaires en agriculture: les villes doivent commencer par utiliser l'eau non polluée puis ce sont les eaux résiduaires urbaines — après un traitement convenable (voir section 7) — qui sont utilisées pour l'irrigation des cultures. Lorsqu'on n'utilise pas les ressources en eau conformément à ce plan, le développement, aussi bien urbain qu'agricole, risque d'être gravement limité, avec des conséquences néfastes pour le développement économique national.

La production d'eaux résiduaires se situe généralement entre 80 et 200 litres par personne et par jour, soit l'équivalent d'environ 30-70 m<sup>3</sup> par personne et par an. Dans ces conditions, les eaux usées produites par une seule personne permettent, dans une région semi-aride où la demande d'eau est, par exemple, 2 m<sup>3</sup> par an (avec des valeurs extrêmes courantes de 1,5 m<sup>3</sup> et de 3 m<sup>3</sup> par an), d'irriguer une superficie de 15-35 m<sup>2</sup>. Autrement dit, une ville comptant 1 million d'habitants produit suffisamment d'eaux résiduaires pour permettre l'irrigation d'environ 1 500-3 500 ha.

## Nutriments

Les matières solides contenues dans les eaux usées, en suspension, à l'état colloïdal ou en solution, contiennent des éléments nutritifs importants pour les végétaux (azote, phosphate et potassium) ainsi que des oligo-éléments (tels que le cuivre, le fer et le zinc). La teneur totale des eaux résiduaires brutes en azote et en phosphore est généralement de l'ordre de 10-100 mg/litre et 5-25 mg/litre respectivement, tandis que la teneur en potassium est comprise entre 10 et 40 mg/litre. Après traitement, les eaux résiduaires sont moins riches en azote et en phosphore, mais contiennent à peu près la même quantité de potassium, selon le procédé de traitement utilisé. Pour un taux d'irrigation de 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an, ce qui correspond en général aux besoins des pays semi-arides, une teneur en azote total et en phosphore total respectivement égale à 15 et à 3 mg/litre dans des eaux résiduaires domestiques correctement traitées (valeurs normales dans l'effluent final d'une série bien conçue de bassins de stabilisation) représente un taux d'épandage de 300 kg/ha pour l'azote et de 60 kg/ha pour le phosphore. L'utilisation d'eaux résiduaires pour l'irrigation permet donc de réduire, voire de supprimer, tout apport supplémentaire d'engrais.

## Contaminants et toxines

A côté de nutriments précieux, les eaux résiduaires contiennent des contaminants et des toxines. Les contaminants sont des agents pathogènes excrétés — virus, bactéries, protozoaires et helminthes responsables de maladies diverses — qui sont présents en nombre variable dans toutes les eaux résiduaires. En Europe, par exemple, les eaux résiduaires domestiques contiennent souvent environ 10<sup>4</sup> salmonelles par litre; dans les pays en développement, les agents pathogènes sont beaucoup plus nombreux et variés. Les dangers qu'ils font peser sur la santé sont étudiés à la section 4, tandis que la section 7 est consacrée à la description des traitements qui permettent de les éliminer avant l'utilisation de l'eau pour l'irrigation.

Les eaux résiduaires, lorsqu'elles contiennent une proportion importante d'effluents industriels, renferment parfois des composés qui sont toxiques à la fois pour les plantes et pour l'homme. Un exemple bien connu est celui des métaux lourds, mais le bore (provenant des détergents de synthèse) constitue une phytotoxine importante, spécialement pour les agrumes. Dans la mesure où leur qualité est conforme aux recommandations formulées par la FAO pour ce type d'utilisation (Ayers & Westcot, 1984), les eaux résiduaires peuvent être utilisées sans aucun risque pour l'irrigation. Les eaux résiduaires domestiques et, en principe, les eaux résiduaires municipales sont en général d'une qualité physico-chimique suffisante pour l'irrigation, de sorte qu'il suffit de se préoccuper de la sensibilité au bore des plantes irriguées.

### **Taux d'épandage**

Le taux d'épandage des eaux résiduaires est calculé de la même façon qu'en cas d'irrigation au moyen d'eau non polluée, c'est-à-dire en tenant compte des quantités nécessaires pour compenser l'évapotranspiration et le lessivage et assurer une salinité et une teneur en sodium convenables (Pettygrove & Asano, 1984).

## **2.2 Utilisation des excreta en agriculture**

L'épandage d'excreta sur le sol à titre d'engrais (figure 2.2) constitue une pratique courante en Chine et au Viet Nam, par exemple, ainsi qu'au Japon depuis une époque récente. C'est la seule utilisation possible en agriculture dans les régions où il n'existe pas de réseau d'égouts et, comme la majorité des logements ne sont pas équipés d'un système d'évacuation des excreta (situation qui a de fortes chances de persister, au moins dans un avenir prévisible), l'utilisation des excreta en agriculture offre des perspectives plus importantes que celles des eaux résiduaires. Il faut donc mettre l'accent sur l'application de techniques d'assainissement sur place qui permettent facilement l'utilisation des excreta accumulés — par exemple les latrines à double fosse ou les latrines à chasse d'eau, ainsi que les cabinets à compost comme ceux qui sont utilisés au Guatemala ou au Viet Nam.

Historiquement, l'importance de l'utilisation des excreta en agriculture peut être appréciée d'après le cas de la Chine où la fertilité du sol est maintenue par cette pratique depuis des milliers d'années (voir encadré 2.2). En 1965, par exemple, environ 90% de la production totale d'excreta humains a servi d'engrais, ce qui représentait 22% du total des nutriments utilisés par les végétaux, y compris ceux qui

Fig. 2.2. Epandage de gadoues sur les plantes cultivées en Chine (province de Taiwan)



provenaient des engrais chimiques; 25% supplémentaires ont été fournis par le fumier animal (Chao, 1970). En plus de l'apport de nutriments, les excréta ont le grand intérêt d'augmenter la teneur du sol en humus, ce qui améliore sensiblement la structure et la capacité de rétention d'eau. En dépit de ces avantages indéniables en agriculture et en horticulture, l'utilisation des excréta à cette fin suscite une vive aversion dans de nombreuses sociétés (voir section 5), alors que l'utilisation de certains produits dérivés des excréta y est courante et acceptée par la société. Au Royaume-Uni, par exemple, 47% du total des boues résultant du traitement des eaux résiduaires sont épandus sur le sol (Water Authorities Association, 1985).

L'utilisation d'excréta en agriculture et en horticulture comporte *a priori* un risque de transmission de maladies associées aux excréta, spécialement lorsqu'on épand sur le sol des excréta non traités. Mais, comme dans le cas de l'utilisation des eaux résiduaires, on sait aujourd'hui concevoir et exploiter des systèmes d'utilisation des excréta qui éliminent la transmission d'agents pathogènes par les cultures fertilisées de cette façon, même dans le cas des salades consommées crues (voir section 7). Il ne faut donc plus considérer l'utilisation des excréta comme une pratique provoquant automatiquement la transmission de maladies, et il convient de s'intéresser plutôt aux avantages réels de la méthode pour l'agriculture et l'horticulture.

## Encadré 2.2 Utilisation d'excreta en agriculture en Asie de l'Est

L'une des pratiques agricoles les plus remarquables qu'ait adoptée un peuple civilisé consiste dans la mise en valeur depuis des siècles, et de façon pratiquement universelle, de la totalité des déchets humains en Chine, en Corée et au Japon [...]. Le fumier humain ainsi mis à profit et répandu dans les champs représentait au Japon, en 1908, 21 636 988 tonnes, ce qui équivaut en moyenne à 3,92 tonnes par hectare pour une superficie totale de 55 226 km<sup>2</sup> de terres cultivées dans les quatre îles principales de l'archipel [...]. En Extrême-Orient, ces déchets sont soigneusement mis à profit depuis plus de 30 siècles, et, de nos jours, une population qui compte 400 millions d'adultes permet d'envoyer chaque année dans les champs 136 000 tonnes de phosphore, 341 000 tonnes de potassium et 1 051 000 tonnes d'azote qui sont contenues dans une masse d'engrais naturel de plus de 165 millions de tonnes.

Source : King (1926)

### Qualité des excréta

Du fait de la diversité des facteurs climatiques et alimentaires, la quantité d'excreta produite est très variable mais on peut néanmoins donner comme chiffre type un volume de 1,8 litre par personne et par jour pour les agglomérations urbaines des pays en développement (Feachem et al., 1983). Ce volume contient environ 350 grammes de matières solides sèches où on trouve environ 90 grammes de matières organiques et des quantités importantes de nutriments utiles pour les plantes (voir tableau 2.3). Le traitement des excréta, outre qu'il détruit les agents pathogènes stabilise les matières organiques, de sorte que les excréta deviennent un meilleur conditionneur de sol, et met les nutriments sous une forme plus directement utilisable par les plantes. Les qualités physico-chimiques et microbiologiques des matières provenant des excréta (par exemple les boues de latrines et de fosses septiques, le compost préparé à l'aide de gadoues et les boues provenant du traitement des eaux résiduaires) dépendent de l'intensité du traitement et doivent être régulièrement contrôlées avant épandage des excréta sur les cultures.

### Taux d'épandage

Les excréta et les matières qui en sont dérivées sont souvent épandus sur le sol avant les semis ou les plantations, à raison, chaque année, d'environ 5-30 t/ha, selon la concentration des nutriments disponibles et la nature des cultures. Ce taux d'épandage n'est pas élevé — puisque, par exemple, 10 t/ha équivalent seulement à 1 kg/m<sup>2</sup> — de sorte

**Tableau 2.3 Teneur approximative en nutriments de divers engrais naturels**

Type d'engrais	Teneur en nutriments (% du poids sec)		
	N total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Matières fécales humaines	5-7	3-5,4	1-2,5
Urines humaines	15-19	2,5-5	3-4,5
Gadoues fraîches <sup>a</sup>	10,4-13,1	2,7-5,1	2,1-3,5
Fumier frais de bovins	0,3-1,9	0,1-0,7	0,3-1,2
Fumier de porcins	4-6	3-4	2,5-3
Résidus végétaux	1-11	0,5-2,8	1,1-11

<sup>a</sup> Matière fécales, urines et 0,35 litre d'eau d'ablution.

Source : Strauss (1985)

qu'un apport d'engrais complémentaire est indispensable pour obtenir un rendement optimal.

Les gadoues urbaines, lorsqu'elles contiennent, en plus des excréta, de petites quantités d'eau de chasse (à raison d'environ 5-10 litres par personne et par jour), sont souvent utilisées, spécialement en Extrême-Orient, pour l'irrigation et pour la fumure. En pareil cas, le taux d'épandage dépend des quantités exigées par les cultures, encore qu'il soit bon de procéder à une irrigation supplémentaire pour éviter le gaspillage des nutriments contenus dans les gadoues.

## 2.3 Utilisation des excréta et des eaux résiduaires en aquaculture

Aquaculture signifie «culture dans l'eau» de même qu'agriculture signifie «culture dans les champs»; le terme est employé à propos de la pratique déjà ancienne de la pisciculture, notamment l'élevage des carpes et des tilapias, ainsi que la culture de certaines plantes aquatiques telles que l'ipomée (*Ipomoea aquatica*), la châtaigne d'eau (*Eleocharis dulcis* et *E. tuberosa*), la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*), la macre (diverses espèces du genre *Trapa*) et le lotus (*Nelumbo nucifera*). L'utilisation comme engrais dans les bassins d'aquaculture de déchets d'origine humaine constitue une pratique millénaire en Asie (figure 2.3) et, de nos jours, les deux tiers au moins des poissons d'élevage consommés dans le monde proviennent de bassins où l'on utilise comme engrais des excréta ou du fumier. Ces poissons constituent la source de protéines animales la moins coûteuse. L'expérience chinoise,

spécialement l'intégration de l'aquaculture dans l'agriculture (voir encadré 2.3), représente un exemple important d'une aquaculture fondée sur l'exploitation des déchets. La Chine produit environ 60% des poissons d'élevage du monde dans des bassins de pisciculture dont la superficie représente 27% de la superficie correspondante pour l'ensemble du monde (2,25 millions de tonnes par an sur une superficie de 7 000 km<sup>2</sup> de bassins en Chine, contre 1,5 million de tonnes par an sur une superficie de 18 000 km<sup>2</sup> de bassins dans le reste du monde). Le rendement moyen des bassins de pisciculture chinois est de 3 200 kilogrammes par hectare et par an, mais, dans des bassins de polyculture intensive bien gérés, le rendement peut aller jusqu'à 7 000 kg/ha par an (Wohlfarth, 1978).

L'utilisation d'excreta non traités pour engraisser les bassins de pisciculture est une pratique qui perd du terrain dans de nombreuses régions du monde et, en Chine, les excreta ne sont désormais utilisés

### **Encadré 2.3 Intégration de l'aquaculture et de l'agriculture en Chine**

« En Chine, l'aquaculture fait partie du système global d'exploitation agricole. Elle est pratiquée soit comme principale activité agricole, soit à titre secondaire ou parallèle, selon l'étendue et la nature du terrain et des ressources hydriques disponibles. Cette intégration des activités agricoles illustre de façon éclatante la façon dont on peut tirer parti de toutes les matières brutes en organisant le recyclage agricole en vue de la production d'aliments. Le fumier est utilisé comme engrais dans les bassins de pisciculture et sur les terres cultivées; le sol, à son tour, produit des aliments pour les animaux, les poissons et l'homme; les déchets des poissons qui s'accumulent dans le bassin d'élevage sont recyclés dans les champs. On comprend les raisons pratiques de l'intégration et de la diversification de l'agriculture et de l'aquaculture.

« L'intégration de l'aquaculture et de l'agriculture n'est pratiquée qu'à une échelle limitée dans d'autres pays, à l'opposé de l'intégration totale qu'on observe en Chine. Cette différence tient principalement au contrôle des moyens de production et au régime de propriété des ressources utilisées en vue de la production. Dans la plupart des pays, le régime foncier est privé de sorte qu'il est difficile de mener une politique unifiée du développement. En Chine, la terre appartient à l'Etat et les programmes de développement sont centralisés au niveau de la direction même si leur mise en œuvre est fortement décentralisée. Cette méthode assure une souplesse à l'échelon local où les responsables peuvent organiser librement leurs activités productives, tout en maintenant un contrôle central des ressources, décisif pour le développement au niveau de la population tout entière. La situation et les besoins locaux constituent la base de la planification qui assure une motivation énergétique en vue de la production et du développement en zone rurale. »

Source : Tapiador et al. (1977).

**Fig. 2.3 Déversement de gadoues dans les bassins de pisciculture en Chine**



qu'après avoir été conservés quatre semaines dans une enceinte fermée (Tapiador et al., 1977). En plus des excréta, on peut se servir comme engrais dans les bassins de pisciculture, des boues provenant des eaux résiduaires ou de la production de biogaz, des boues de fos-

ses septiques et du compost fabriqué à partir d'excreta (Polprasert et al., 1982; Huggins, 1985; Zandstra, 1986). Plus récemment, l'aquaculture s'est orientée vers deux nouvelles productions, celles d'algues microscopiques dans des bassins spéciaux à haut rendement et celle de crustacés de prix, comme la crevette et l'écrevisse.

L'élevage des poissons donne de bons résultats dans les bassins de maturation qui font partie d'une série de bassins de stabilisation (Bartone, 1985; Payne, 1985), avec un rendement annuel qui peut atteindre 3 000 kilogrammes par hectare. Des précautions sont nécessaires pour maintenir dans le bassin un régime aérobie et une concentration en ammoniac non ionisé suffisamment faible ( $< 0,5$  mg d'azote par litre), faute de quoi les poissons sont tués (Bartone et al., 1985). La vente des poissons d'élevage peut servir à financer l'amélioration de la gestion et de l'entretien des réseaux d'égouts municipaux dans les pays en développement (Meadows, 1983).

## Taux d'épandage

Malgré la multitude de rapports consacrés aux succès de la pisciculture et de la culture de macrophytes aquatiques dans des bassins engraisés au moyen d'excreta et d'eaux résiduaires, il n'existe pratiquement aucune donnée sur les taux d'épandage correspondants. Les bassins de pisciculture de Munich (République fédérale d'Allemagne) où l'on utilise comme engrais des eaux résiduaires décantées, reçoivent une quantité moyenne annuelle de matières organiques qui correspond à une DBO (demande biochimique d'oxygène) de l'ordre de 33-77 kilogrammes par hectare et par jour (Edwards, 1985). Sur la base d'un apport théorique correspondant à une DBO de 50 kilogrammes par hectare et par jour et d'une contribution individuelle correspondant à une DBO de 25 grammes par jour (sous forme d'eaux résiduaires décantées ou de gadoues brutes), cela correspond à 1 hectare de bassin d'élevage pour 2 000 personnes. Mais, en Chine, les excreta et le fumier sont déversés dans les bassins à raison de 40 000 kg/ha, ce qui correspond à une superficie d'environ 1 hectare pour 45 porcs ou pour 115 personnes (Tapiador et al., 1977). Les indications fournies par Edwards & Kaewpaitoon (1984) valent pour l'exploitation d'une petite entreprise de pisciculture, mais il est certain que des travaux complémentaires sont nécessaires en vue d'élaborer des directives plus rationnelles concernant le déversement de déchets d'origine humaine dans les bassins de pisciculture.

# 3

## Exemples de réutilisation des déchets d'origine humaine

Les systèmes d'irrigation au moyen d'eaux résiduaires mis en œuvre en République fédérale d'Allemagne, en Australie, en Inde, au Mexique et en Tunisie font l'objet de la présente section, de même que l'utilisation d'excreta ou de produits dérivés en Chine, aux Etats-Unis d'Amérique, au Guatemala ou en Inde. On trouvera en outre un exposé de l'utilisation en aquaculture (pour l'élevage de poissons) d'eaux résiduaires et d'excreta en Inde et en Indonésie. On connaît de nombreux autres exemples de réutilisation des déchets (voir tableau 2.1, page 28); ceux qui sont retenus ici l'ont été de manière à représenter la plus grande variété possible d'emplacements géographiques, de contextes socio-culturels, de tailles de l'exploitation, de procédés de traitement, de techniques d'épandage et de types de cultures.

### 3.1 Utilisation des eaux résiduaires en agriculture

#### 3.1.1 Allemagne fédérale

L'utilisation d'eaux résiduaires traitées pour l'irrigation est pratiquée depuis 1971 dans la ville de Brunswick (population actuelle : 325 000 habitants du nord de la République fédérale d'Allemagne (Kayser, 1985). On traite chaque jour 55 000 m<sup>3</sup> d'eaux résiduaires en les faisant passer dans des bassins d'oxygénation puis des bassins de sédimentation secondaire. Les 44 500 m<sup>3</sup> d'eau traitée obtenus chaque jour (y compris un volume quotidien de 5 100 m<sup>3</sup> de boues non épaissies et 5 000 m<sup>3</sup> d'eaux non traitées provenant des villages proches des champs irrigués) permettent d'irriguer 2 800 ha de terres cultivées. Le système d'irrigation est géré par l'Association pour l'utilisation des eaux résiduaires de Brunswick (AUEB) dont les membres sont la municipalité et les 440 propriétaires exploitants. La zone irriguée est subdivisée en quatre districts dont chacun possède sa station de pompage et sa citerne d'équilibrage des eaux résiduaires. Les eaux résiduaires sont distribuées au moyen de conduites enterrées en amiante-ciment (100-500 mm de diamètre) et des bouches d'eau enterrées sont placées

tous les 90 m. Les eaux résiduaires sont répandues dans les cultures au moyen d'asperseurs (munis de buses de 20 mm de diamètre) alimentés par un tuyau flexible monté sur enrouleur. En fonctionnement normal, il faut 20 heures à un asperseur fonctionnant sous une pression de 4 bars (400 kPa) pour répandre une couche d'eaux résiduaires de 50 mm sur une bande de terre mesurant 300 m × 50 m. En général, 50-60 machines sont en fonctionnement mais ce chiffre peut être porté à 100 en été lorsqu'on se sert également des eaux souterraines pour l'irrigation ; six gros tracteurs permettent de mettre en place les machines et de dérouler les 300 m de tuyau dans le champ. Chaque tracteur est confié à deux conducteurs en été et à un seul en hiver lorsqu'on pratique l'irrigation sous faible pression, principalement pour se débarrasser des eaux résiduaires.

Le taux annuel d'épandage des eaux résiduaires correspond à une hauteur d'eau de 580 mm, soit un apport d'éléments nutritifs (kg/ha par an) de 379 pour l'azote, 106 pour le phosphore et 105 pour le potassium. Comme il s'agit d'un sol léger et très perméable, un chaulage est nécessaire pour maintenir le pH et l'on utilise en outre des engrais supplémentaires, potassiques et azotés. Les principales plantes cultivées sont des céréales d'hiver et d'été, de la betterave à sucre et des pommes de terre. Les rendements sont sensiblement les mêmes que dans les champs irrigués au moyen d'eaux souterraines et fertilisées au moyen d'engrais artificiels.

Seule une faible proportion de la quantité totale d'eaux résiduaires répandue dans les champs est recueillie dans les canalisations de terre cuite puis déversée dans une rivière locale ; la majeure partie est éliminée soit par évaporation, soit dans les eaux souterraines. La qualité de l'effluent final est excellente (DBO par litre inférieure à 1 mg) encore que la concentration des nitrates, correspondant à 25 mg d'azote par litre, pose de graves problèmes. En revanche, aucun problème ne se pose du fait de l'accumulation de métaux lourds dans le sol.

Les dangers pour la santé sont réduits au minimum grâce à l'interdiction de cultiver des légumes ou des fruits dans la zone irriguée et à l'application d'un arrêté de l'AUEB destiné à empêcher la propagation d'agents pathogènes par les asperseurs. L'arrêté stipule que des haies de 10 m de large doivent être plantées le long des voies publiques et que l'irrigation est interdite à moins de 50 m de ces voies et de 100 m des habitations. A moins de 115 m des routes et des maisons, il faut utiliser des asperseurs spéciaux de faible hauteur, tandis que l'emploi des appareils à moins de 100 m des routes n'est autorisé que lorsque le vent souffle des routes vers les champs. L'irrigation est interrompue 3 semaines avant la récolte. Les enquêtes montrent que ces mesures suffisent à empêcher la transmission de maladies.

Le système d'irrigation de l'AUEB est géré de façon rigoureuse. Un calendrier d'irrigation est élaboré chaque année en hiver, conformément aux plans d'exploitation des agriculteurs. En été, le calendrier d'irrigation est revu chaque semaine en fonction des conditions météorologiques effectives. Le personnel de l'AUEB est responsable de l'exploitation de l'ensemble du système, de l'entretien des stations de pompage, de la mise en place des machines, de la maintenance générale et des réparations. En outre, deux employés sont chargés d'un contrôle interne visant à assurer le respect rigoureux de l'arrêté ci-dessus.

La consommation d'énergie est importante, de l'ordre de 0,5 kWh par mètre cube d'eaux résiduaires traitées et utilisées pour l'irrigation, soit un total annuel de l'ordre de 8 millions de kWh. Les dépenses d'exploitation sont en rapport, avec un montant annuel de près de 8 millions de Deutsche Marks (soit environ 4 millions de dollars E.-U.) dont 5% sont à la charge des agriculteurs qui paient une taxe de 120 DM (60 dollars E.-U.) par hectare de terre irriguée. La municipalité de Brunswick prend le reste à sa charge, en justifiant ce coût par l'intérêt du système qui permet à la fois de se débarrasser efficacement des boues et d'assurer un traitement tertiaire élaboré des eaux résiduaires.

### **3.1.2 Australie**

L'exploitation de Werribee est entrée en fonctionnement en 1897 pour devenir la principale exploitation irriguée au moyen d'eaux résiduaires de Melbourne ; elle a été conçue pour une population de 1 million d'habitants. A l'heure actuelle, elle reçoit un débit moyen journalier d'environ 470 000 m<sup>3</sup> d'eaux résiduaires mixtes, domestiques et industrielles. Elles sont traitées soit dans des bassins de stabilisation (d'une superficie de 1 500 ha), soit par filtration sur le sol ou sur l'herbe. La zone de filtration sur le sol occupe une superficie de près de 4 000 ha et assure le traitement d'un débit d'eaux résiduaires de l'ordre de 195 000 m<sup>3</sup> par jour au cours des mois d'été, d'octobre à avril. Pour l'essentiel, les eaux résiduaires brutes servent à irriguer des pâturages. L'irrigation est pratiquée par rotation, sur une période de trois semaines: après 2 jours d'épandage d'eaux résiduaires jusqu'à atteindre 100 mm de hauteur, on laisse sécher pendant cinq jours et les pâturages servent ensuite pendant 2 semaines à la nourriture du bétail, principalement des bovins et des moutons. Chaque saison, on procède à 10 ou 11 épandages d'eaux résiduaires. La moitié environ de ces eaux se perdent par évapotranspiration et par infiltration en profondeur dans le sous-sol, le reste étant recueilli par une série de canalisa-

tions qui transportent les effluents jusqu'à la baie de Port Philip où ils sont déversés (Kirby, 1967). Comme procédé de traitement des eaux résiduaires, la méthode est très efficace puisqu'elle assure l'élimination de 98 % de la DBO et de 93 % des matières solides en suspension. En hiver, la filtration sur le sol est impraticable car l'évapotranspiration est trop faible, et elle est remplacée par une filtration sur herbe. On assure ainsi le traitement, sur une superficie de 1 500 ha, d'un volume quotidien d'environ 250 000 m<sup>3</sup> d'eaux résiduaires primaires décantées. A la fin de la saison, une fois que les graines sont tombées, ces pâturages servent à l'alimentation des bovins.

L'exploitation comporte un bétail nombreux. Le troupeau compte environ 13 000 bovins adultes, qui donnent naissance à environ 6 500 veaux chaque hiver ; la plupart de ces derniers sont engraisés et vendus à l'âge de 18-22 mois. La proportion des carcasses qui sont rejetées du fait de leur contamination par *Cysticercus bovis* (larves du ténia du bœuf ou ténia inerme) atteint seulement 0,02%, soit sensiblement la même proportion que pour les bovins des autres exploitations locales ; cela prouve que le système d'irrigation empêche efficacement la transmission du ténia. En été, l'exploitation compte environ 30 000 moutons ; la plupart sont vendus à l'automne, à l'exception de 6 000 d'entre eux qui sont conservés pour brouter l'hiver. Ces activités d'élevage assurent un revenu annuel brut d'environ 3 millions de dollars australiens (2,12 millions de dollars E.-U.) (Camp Scott Furphy Pty Ltd, 1986).

### 3.1.3 Inde

D'après un rapport récent rédigé à l'intention de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture) (Shende, 1985), il existe actuellement en Inde plus de 200 systèmes d'irrigation au moyen d'eaux résiduaires, représentant une superficie totale d'environ 73 000 ha. Mais, bon nombre de ces systèmes sont gérés «de façon rudimentaire et irrationnelle», et font peser des risques importants sur la santé car la majeure partie des eaux résiduaires utilisées pour l'irrigation ne sont pas traitées (voir section 4.3). Le taux d'épandage est excessif (jusqu'à atteindre une hauteur de 12 m par an), d'où un apport très élevé en éléments nutritifs (représentant jusqu'à 600 kg d'azote total par hectare et par an), car la plupart des systèmes ont pour principal objectif l'évacuation des eaux résiduaires et non une mise en valeur optimale des ressources. On trouvera des indications sur les 13 principaux systèmes au tableau 3.1. L'irrigation se fait en surface, par divers procédés allant d'une submersion non contrôlée à l'application relativement correcte de méthodes telles que l'irriga-

**Tableau 3.1 Quelques précisions sur treize exploitations agricoles indiennes pratiquant l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires**

Lieu	Superficie (ha)	Volume d'eaux résiduaires utilisées 10 <sup>3</sup> l/j	Traitement éventuel	Dilution éventuelle (m <sup>3</sup> /jour/ha)	Taux d'épandage (m <sup>3</sup> /jour/ha)	Type de sol	Nature des cultures
Ahmedabad	890,3	299,9	Néant	Néant	336,8	Limon sableux	Graminée pochia, paddy, maïs, durra, blé, luzerne
Amritsar	1 214,1	54,5	Néant	1:3	44,9	Argile sableuse	Maïs, trèfle d'Alexandrie, sorgho, luzerne
Bikaner	40,4	13,6	Néant	Néant	336,8	Sol sablonneux	Mil à chandelle, blé, graminées, légumes
Bhilai	607	36,3	Secondaire (bassin de stabilisation)	Néant	59,9	Limon sableux, limon argileux	Paddy, maïs, blé, tuwar, légumes
Delhi	1 214,1	227,2	Primaire et secondaire	Néant	187,1	Limon sableux, sable limoneux	Durra, mil à chandelle, maïs, orge, blé, légumineuses, légumes
Gwalior	202,3	11,3	Néant	Néant	56,1	Limon silteux, limon argileux	Paddy, maïs andguar, durra, dolique, blé, pomme de terre, trèfle d'Alexandrie, légumes
Hyderabad	607	95,4	Primaire	1:1,5	157,2	Limon	Herbe de para, paddy
Jamshedpur	113,3	9,1	Boues activées secondaires	Néant	80,2	Limon argileux	Herbe à éléphant, herbe de para, grand mil, trèfle d'Alexandrie, durra, maïs
Kanpur	1 416,5	31,8	Néant	1:1	22,4	Limon, limon silteux	Blé, paddy, maïs, orge, pomme de terre, avoine, légumes
Madras	133,5	6,8	Néant	Néant	51:0	Limon sableux à silteux	Herbe de para
Madurai	76,9	136	Néant	Néant	117:3	Limon sableux rouge	Grand mil
Trivandrum	37,2	8,6	Néant	1:1	231,9	Sable	Herbe de para
Lucknow	150	300	Néant	1:3	—	Limon sableux	Maïs, paddy, pomme de terre, légumes, fruits, papaye, banane plantain, agrumes

<sup>a</sup> Million de litres par jour.  
Reproduit avec l'autorisation de Shende (1985).

**Tableau 3.2 Rendement, dans l'exploitation de Poona, des cultures irriguées avec l'eau des canaux et au moyen d'eaux résiduaires, diluées ou non**

Culture	Rendement annuel (t/ha)		
	Eau des canaux <sup>a</sup>	Eaux résiduaires diluées <sup>b</sup>	Eaux résiduaires non diluées
Betterave	8,75	15,60	16,27
Carotte	9,71	8,72	11,75
Radis	7,26	6,14	8,33
Curcuma	—	20,64	21,59
Pomme de terre	6,12	7,00	9,33
Gingembre	6,04	9,18	9,80
Papaye	26,72	27,91	37,00
Kholkhol	9,70	11,76	16,57
Chou	9,27	11,32	12,13
Chou-fleur	6,96	7,08	9,09
Gombo	2,82	3,60	5,89
Haricot vert	6,63	8,20	8,06
Tomate	10,01	—	13,38
Tabac	1,12	1,25	1,25
Arachide	2,88	2,90	3,17
Sucre (de canne)	—	52,75	54,43
Sucre (de palme)	—	5,67	5,78

<sup>a</sup> Fumure du terrain avant la plantation

<sup>b</sup> Dilution à 1 :1

Reproduit avec l'autorisation de Shende (1985).

tion par infiltration, par calants ou au moyen de bassins de retenue. L'irrigation souterraine et l'irrigation par aspersion ne sont pas pratiquées en Inde dans les exploitations agricoles où l'on utilise des eaux résiduaires.

Malgré ce tableau généralement sombre de la situation actuelle de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires en Inde, il existe quelques succès notables. L'expérience acquise par le National Environmental Engineering Research Institute (NEERI) au terme d'études prolongées sur le terrain autorise les conclusions suivantes:

- Les rendements céréaliers sont notablement accrus par l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires par comparaison avec l'irrigation n'utilisant que de l'eau non polluée, même lorsque les eaux résiduaires brutes sont diluées dans deux fois leur volume d'eau non polluée. Les rendements peuvent encore être augmentés par apport supplémentaire d'engrais NPK jusqu'à atteindre les doses recommandées.

- Les rendements des cultures maraîchères sont également beaucoup plus élevés lorsqu'on emploie pour l'irrigation des eaux résiduaires au lieu d'eau non polluée et de fumier, comme c'est de tradition (voir tableau 3.2).
- L'irrigation au moyen d'eaux résiduaires assure une meilleure utilisation des nutriments et permet l'obtention durable de rendements élevés (voir encadré 2.1, page 31).
- L'arrosage des arbres au moyen d'eaux résiduaires brutes donne des rendements analogues à ceux qu'on obtient en utilisant des eaux non polluées — soit, pour l'eucalyptus, environ 55 tonnes de bois d'œuvre commercialisable par hectare au bout de 24 mois, ce qui correspond à une valeur marchande de 27 700 roupies (2 170 dollars E.-U.).
- L'influence de ce type d'irrigation sur les propriétés du sol dépend dans une très large mesure de caractéristiques initiales du sol, mais, dans de nombreux cas — même après 30 ans d'irrigation par ce procédé — la productivité reste extrêmement favorable.

### 3.1.4 Mexique

Le développement agricole au Mexique est largement subordonné à l'irrigation puisque 77% des terres sont arides ou semi-arides et que les précipitations annuelles pour l'ensemble du pays atteignent seulement en moyenne 760 mm, avec une saison des pluies qui va pour l'essentiel de juillet à septembre. L'utilisation des eaux résiduaires en agriculture constitue une pratique dans presque toutes les régions du pays voisines d'une grande ville dotée d'un réseau d'égouts. Dans certains périmètres d'irrigation, on utilise un mélange d'eau non polluée et d'eaux résiduaires mais, dans le périmètre de développement rural N° 063 de la vallée de Mezquital, dans l'Etat Hidalgo, la quasi-totalité de l'eau utilisée pour l'irrigation est fournie par les eaux résiduaires du Grand Mexico, zone qui compte au total 18 millions d'habitants. Les eaux résiduaires sont utilisées dans deux périmètres d'irrigation (N° 03 et 100) qui correspondent à une superficie totale de 85 000 ha de terres irrigables, dont 80 000 sont irriguées à l'heure actuelle. Les principales cultures sont la luzerne, le maïs, le blé, l'avoine, les haricots, la tomate, le piment et la betterave. Le débit total des eaux résiduaires et des eaux de pluie s'élève à 55 m<sup>3</sup>/s, dont 30-45 m<sup>3</sup>/s pour les eaux résiduaires non traitées, ce qui fait du système d'utilisation des eaux résiduaires de Mexico le plus important au monde (Villalo-

bos et al., 1981; Duron, 1985; Strauss, 1986a; Romero-Alvarez, communication personnelle, 1987).

L'ensemble des eaux résiduaires et des eaux de pluie de la ville de Mexico est acheminé, par trois grands canaux, jusqu'au bassin de Tula, qui se trouve au nord de la ville. Cette région, située à environ 2 000 m au-dessus du niveau de la mer, a une température moyenne de 17 °C et est semi-aride: les précipitations annuelles s'élèvent en moyenne à 483 mm et l'évaporation à 810 mm. C'est dire que l'irrigation est essentielle au succès de l'agriculture. Les eaux résiduaires ne sont pas traitées à proprement parler mais dans une certaine mesure, elles subissent un traitement naturel sur les 60 km qui séparent Mexico de Tula. Un traitement complémentaire intervient dans les réservoirs de stockage qui sont utilisés pour régulariser le débit des canaux d'irrigation. Certains de ces réservoirs sont en outre alimentés par des cours d'eau locaux, ce qui assure la dilution des eaux résiduaires.

Dans le périmètre d'irrigation N° 03, à l'intérieur du bassin de Tula, on compte environ 200 km de canaux d'irrigation principaux et 350 km de canaux latéraux, répartis sur une superficie totale de 43 000 ha. Le volume d'eau utilisé pour l'irrigation, par l'intermédiaire, le plus souvent, de réservoirs de régularisation, représente  $1-1,4 \times 10^9$  m<sup>3</sup> par an. On est mal renseigné sur la qualité de cette eau mais on sait que, malgré sa qualité généralement médiocre, elle n'a soulevé aucun problème grave depuis 30 ans du point de vue de la salinité, de la teneur en sodium ou en métaux lourds. Ce résultat est attribué aux caractéristiques locales du sol, riche en calcaire et assurant un bon drainage interne, ce qui empêche l'accumulation de sels dissous et de sodium échangeable. Les plantes cultivées supportent la quantité de bore relativement importante que contient l'eau d'irrigation, mais certaines plantes irriguées avec les eaux résiduaires (par exemple la luzerne) sont plus riches en métaux lourds (cadmium, chrome, sélénium et zinc) que les plantes irriguées avec une eau non polluée. On ne dispose d'aucune donnée précise sur la qualité bactériologique, mais certains échantillons renferment  $10^3$  à  $10^8$  coliformes fécaux par 100 ml.

Le périmètre d'irrigation produit une quantité considérable de denrées alimentaires, principalement destinées aux marchés de Mexico et à la consommation locale (voir figure 3.1). En plus des principales cultures indiquées au tableau 3.3, on pratique la culture maraîchère sur une superficie d'environ 400 ha; des limitations sont imposées qui interdisent la culture de la laitue, du chou, de la betterave, du coriandre, du radis, de la carotte, de l'épinard et du persil. Le personnel chargé des canaux et des vannes du Périmètre, qui a des liens étroits avec les agriculteurs, doit veiller au respect de ces interdictions. Il existe

**Fig. 3.1 Exploitation agricole du périmètre d'irrigation 03 du Mexique, irriguée au moyen des eaux résiduaires non traitées de Mexico**

Ce jeune garçon, qui ne porte pas de chaussures, risque de contracter l'ankylostomiase du fait de la méthode d'irrigation utilisée (par submersion).



**Tableau 3.3 Rendement des principales cultures et superficies correspondantes dans le Périmètre d'irrigation N° 03, vallée du Mezquital, Mexique**

Culture		Superficie exploitée (ha) et rendement (kg/ha)			
		1970-71	1975-76	1980-81	1985-86
Maïs	Superficie	17 914	21 023	17 907	1 9539
	Rendement	3 938	3 896	4 566	4 600
Haricot	Superficie	1 266	1 222	1 646	1 501
	Rendement	1 259	1 768	1 521	1 800
Blé	Superficie	7 293	2 634	2 005	167
	Rendement	1 919	3 119	3 225	2 900
Luzerne	Superficie	12 708	15 206	20 339	20 630
	Rendement	95 300	89 154	91 175	81 200
Avoine	Superficie	2 998	691	1 002	1 592
	Rendement	18 150	19 898	32 470	23 600
Orge	Superficie	—	832	1 812	1 514
	Rendement	—	19 620	19 939	15 500
Pâturages	Superficie	13	11	65	30
	Rendement	142 500	107 000	44 276	89 100

Source : Duron (1985) et Secrétariat à l'agriculture et aux ressources hydriques (communication personnelle).

aussi une production de fruits et de fleurs, de faible importance mais de grande valeur. Des recherches sont en cours en vue de cultiver des oléagineux (tournesol, safran bâtard et colza).

Du point de vue administratif, les périmètres d'irrigation qui ont été créés sous leur forme actuelle par un décret présidentiel de 1955, sont placés sous la direction d'un comité qui réunit des représentants de l'administration centrale (secrétariat à l'agriculture et aux ressources hydriques, SARH), les agriculteurs et les organismes locaux de crédit. L'Administration du périmètre exerce les fonctions suivantes:

- construction, exploitation et entretien des canaux d'irrigation et de drainage;
- entretien des voies d'accès;
- répartition de l'eau d'irrigation entre les agriculteurs;
- administration des plans de campagne des agriculteurs;
- application des arrêtés interdisant certaines cultures;

- mise à la disposition des exploitants d'un service de vulgarisation agricole.

Les périmètres d'irrigation N° 03 et 100 sont subdivisés en plusieurs zones administratives. Les exploitants font connaître leurs besoins d'eau d'irrigation au bureau local du district, en précisant volume et calendrier. Les exploitants — petits exploitants ou membres de coopératives — paient une taxe de 40 pesos (0,12 dollars E.-U.) par hectare et cycle d'irrigation (soit l'équivalent d'environ 20 pesos (0,06 dollars E.-U. pour 1 000 m<sup>3</sup>) qui ne suffit pas à couvrir la totalité des frais, de sorte que l'Etat doit verser des subventions. Le cycle d'irrigation a une période de 25-30 jours.

Le succès du système d'utilisation des eaux résiduaires de la ville de Mexico s'explique par un certain nombre de facteurs, à savoir :

- les caractéristiques pédologiques locales, favorables à l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires;
- les gains importants de productivité résultant de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires, méthode qui permet plusieurs récoltes par an;
- la présence de vastes étendues de terre semi-arides au départ;
- un réseau de distribution des eaux usées, très développé et bien entretenu;
- l'amélioration de la sécurité pour les agriculteurs locaux qui n'ont plus besoin de compter uniquement sur la pluie mais ont à leur disposition un volume sans cesse croissant d'eaux résiduaires;
- bonne gestion des périmètres d'irrigation au moyen d'eaux résiduaires, avec plus de 80 années d'expérience de la méthode;
- absence de tout risque manifeste de transmission de maladies associées aux excréta.

### **3.1.5 Tunisie**

La Tunisie est un pays très agricole, avec 90 000 km<sup>2</sup> de terres cultivées pour une superficie totale de 160 000 km<sup>2</sup>, et 50% de population rurale sur un total de 7 millions d'habitants. Les principaux produits sont le blé, l'orge, les agrumes, les olives, les dattes et le vin, et

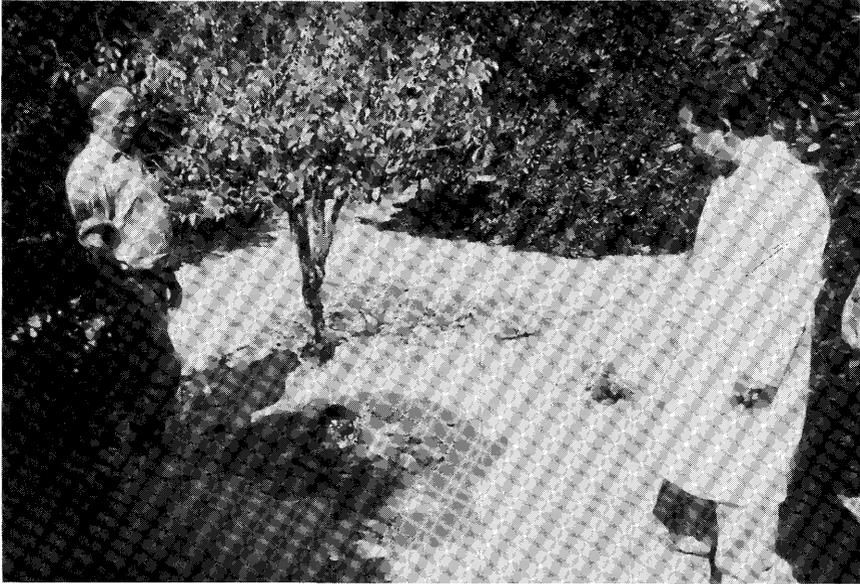
les exportations de produits agricoles procurent des recettes importantes. Les pluies sont rares en été, mais l'agriculture irriguée est bien développée. On utilise de plus en plus fréquemment des eaux résiduaires car les autres sources d'eau (retenues, eaux souterraines) deviennent insuffisantes, sur le plan qualitatif comme sur le plan quantitatif. Pour éviter un pompage excessif des eaux souterraines, on se sert d'eaux résiduaires, ce qui a accessoirement le grand intérêt d'empêcher l'intrusion d'eau saumâtre dans les nappes aquifères de la région côtière. A l'heure actuelle, 12 systèmes de réutilisation fonctionnent, 3 autres sont en cours d'installation et 5 autres à l'état de projet (Strauss, 1986b). Les eaux résiduaires utilisées pour l'irrigation sont le plus souvent des effluents secondaires mais on se sert aussi dans une certaine mesure de boues provenant de stations d'épuration. Les cultures irriguées de la sorte sont variées : agrumes et autres arbres fruitiers (figure 3.2), plantes fourragères et légumes. Dans un site touristique, le parcours de golf est arrosé au moyen de l'effluent d'une station d'épuration utilisant le procédé des boues activées.

Les eaux résiduaires de Tunis, la capitale du pays, sont recyclées dans l'irrigation des agrumes depuis 1964. Dans le district voisin de Soukra, on irrigue ainsi environ 600 ha et des plans sont à l'étude pour généraliser dans un proche avenir l'utilisation des eaux résiduaires à une superficie d'environ 5 000 ha, dans les trois principaux périmètres d'irrigation autour de Tunis. Les effluents de quatre installations d'épuration (deux selon le principe des boues activées, un complexe de bassins de stabilisation et un fossé d'oxydation) seront utilisés ce qui représente un débit total d'environ 250 000 m<sup>3</sup>/jour. Les bassins de stabilisation de la Côtière Nord comportent deux séries parallèles de trois bassins chacune (le premier étant aéré par voie mécanique) qui se déversent dans un bassin quaternaire commun. La durée totale de rétention est en principe de 180 jours mais, au débit théorique maximal, de 58 jours ; la qualité bactériologique de l'effluent est certainement conforme aux valeurs microbiologiques recommandées par un groupe scientifique de l'OMS pour la réutilisation des eaux résiduaires en agriculture.

Les eaux résiduaires sont distribuées aux agriculteurs par les autorités chargées du développement agricole local, qui rendent compte au ministère de l'Agriculture. Ces autorités construisent et entretiennent le réseau de distribution des eaux résiduaires (canalisations, stations de pompage, réservoirs de stockage, etc.), répartissent les eaux résiduaires entre les agriculteurs conformément à un système de distribution organisé, et encaissent les taxes. Les agriculteurs sont responsables de la distribution des eaux résiduaires dans les limites de leur exploitation et versent 0,025 dinars (0,031 dollars E.-U.) par mètre

**Fig. 3.2. Verger d'agrumes en Tunisie, irrigué au moyen d'eaux résiduaires traitées**

La distribution de l'eau se fait par conduites enterrées, tandis que des tuyaux de refoulement l'amènent dans la cuvette creusée autour de chaque arbre.



cube d'eau aux autorités, la facturation étant trimestrielle. Les autorités interdisent l'irrigation de cultures dont les produits sont consommés crus et sont légalement habilitées à faire respecter cette interdiction. Leur personnel entretient des contacts réguliers avec les exploitants et veille au bon fonctionnement du système.

## **3.2 Utilisation des excreta en agriculture**

### **3.2.1. Chine**

En Chine, les déchets organiques naturels sont massivement utilisés comme engrais. Ces déchets comprennent les excreta, les déchets domestiques, le fumier (provenant principalement de porcs et de vaches), les résidus de plantes cultivées et l'engrais vert obtenu à partir de plantes aquatiques, par exemple des fougères aquatiques du genre *Azola*. Les gadoues urbaines sont ramassées et transportées par chariots, tracteurs et bateaux jusqu'aux zones rurales. En 1981, les gran-

des villes et les villes d'importance moyenne ont ainsi procuré 73 millions de tonnes de gadoues et 73 millions de tonnes de déchets ; sur ce total, environ 40 millions de tonnes ont été réutilisées en agriculture et en aquaculture. Bien qu'il soit en passe de devenir plus fréquent, le traitement est relativement rare puisque moins de 5% des déchets réutilisés en bénéficient ; le procédé de traitement le plus courant est le compostage. Les déchets urbains qui ne sont pas directement utilisés en agriculture sont généralement éliminés dans des décharges hygiéniques qui, lorsqu'elles sont pleines, sont très souvent utilisées pour la production agricole (Zhongjie, 1986).

Dans les régions rurales de Chine, on réutilise les déchets d'une population d'environ 800 millions de personnes : le taux d'utilisation des excreta dépasse 70% (Zhongjie, 1986). Le fumier est très employé, représentant 1,3 milliard de tonnes en 1981 contre 150 millions de tonnes d'excreta. Ces derniers sont généralement conservés quatre semaines avant l'usage, de façon à permettre la destruction des œufs d'helminthe. La préparation d'un compost mixte, à partir d'excreta humains et animaux et de résidus de culture, constitue une pratique fréquente, de même que l'épandage des boues qui proviennent de la production de biogaz. Ces procédés permettent de produire chaque année près de 2 milliards de tonnes d'engrais organiques. Les engrais artificiels sont employés, mais diverses raisons (FAO, 1977) font qu'on continuera de faire principalement appel aux engrais organiques préparés à partir des déchets :

- le pays a 4 000 ans d'expérience dans l'adaptation des divers types d'engrais organiques à la qualité locale du sol, et il faudra longtemps pour obtenir une connaissance équivalente des engrais artificiels ;
- les engrais artificiels sont relativement coûteux tandis que les engrais organiques sont largement disponibles, à un coût nul ou minime ;
- en général, les agriculteurs accordent la préférence aux engrais organiques car ces derniers augmentent la teneur du sol en humus, améliorent sa structure et augmentent sa capacité de rétention d'eau ;
- la nature du sol en Chine fait qu'en général un apport d'azote est plus bénéfique qu'un apport de phosphate, lui-même préférable à un apport de potassium ; la plupart des sols ne sont pas pauvres en micronutriments du fait de l'utilisation prolongée d'engrais organiques ;

- la construction d'usines d'engrais artificiels est très coûteuse, si bien que la création d'une industrie des engrais devra être progressive et s'appuyer davantage sur les ressources intérieures que sur les importations.

La majeure partie des excreta d'origine humaine et animale ainsi que le compost qui en dérive sont en général épandus lors de la préparation du sol, avant la plantation, et enfouis par labourage ou hersage. Le taux d'épandage varie selon la nature du sol, des plantes cultivées et la saison, mais il est en général de 100-300 t/ha par an de compost et de 20-30 t/ha de gadoues liquides à chaque épandage. Ce taux est régi principalement par la quantité de nutriments disponibles, spécialement l'azote, le souci d'éviter toute inhibition de la germination et de la croissance des jeunes pousses, ainsi que par les limites pratiques du volume qui peut être répandu dans les champs ou incorporé au sol.

L'expérience montre qu'un taux d'épandage même relativement faible (15-40 t/ha par an) de compost préparé à l'aide d'excreta permet une augmentation notable du rendement (FAO, 1977) puisqu'elle atteint 29% pour le maïs, 48% pour le mil, 89% pour la pomme de terre, 85% pour le sorgho, 23% pour le soja, 26% pour la betterave à sucre et 39% pour le blé.

### **3.2.2. Etats-Unis d'Amérique**

La ville de Kearney, au Nebraska, compte 25 000 habitants et produit chaque année de 3 000 à 4 000 tonnes de boues dans sa station de traitement des eaux résiduaires (Anon., 1986). Avant 1984, ces boues étaient débarrassées de leur eau et les matières solides ainsi obtenues (20% du total) étaient transportées à 25 kilomètres pour être déchargées sur un terrain d'aviation abandonné. Désormais, elles sont transportées sur 400 mètres seulement jusqu'à une exploitation locale où elles servent à la fabrication d'un compost mixte avec le fumier du parc d'engraissement. Les boues et le fumier sont mélangés dans la proportion de 1 pour 2, et la préparation du compost se fait en tas allongés soumis à un brassage mécanique pendant 5 semaines, le compost obtenu étant ensuite stocké 4 ou 5 mois. Il est ensuite réparti sur une superficie de 1 200 ha de terres agricoles (utilisées pour la culture du maïs) à deux reprises chaque année, au printemps et en automne, à raison de 7,5-10 t/ha. Il contient suffisamment de phosphore et de potassium mais un supplément d'azote est nécessaire par suite du caractère sableux du sol. Le prix au détail du nutriment contenu dans le compost est élevé, de l'ordre de 28 dollars E.-U. par tonne

**Tableau 3.4 Prix au détail des nutriments contenus dans le compost préparé à partir de boues de traitement et de fumier d'un parc d'engraissement à Kearney, Nebraska**

Nutriment	Concentration dans le compost (kg/t)	Coût (cent./kg)	Valeur (\$ E.-U./t de compost)
Azote	6,4	59,4	3,80
Phosphore	7,3	66,0	4,82
Potassium	30,9	33,0	10,20
Soufre	2,3	50,6	1,16
Zinc	0,1	330,0	0,33
Calcium	11,8	1,8	0,21
Magnésium	3,2	5,5	0,18
Fer	1,8	330,0	5,94
Manganèse	0,1	163,0	0,16
Cuivre	0,2	748,0	1,50

Valeur totale en \$ E.-U. : 28,30

(voir tableau 3.4). La capacité de rétention d'eau du sol est améliorée grâce à sa teneur accrue en humus, et aucun engrais artificiel n'est nécessaire (sauf pour apporter le supplément d'azote). Bien qu'il s'agisse ici d'une exploitation de petite ampleur, il est manifeste que la méthode pourrait fort bien être reproduite dans une situation d'agriculture intensive.

### 3.2.3. Guatemala

Après le tremblement de terre de 1976, le Centro Mesoamericano de Estudios sobre Tecnología Apropiada (CEMAT) a mis au point des techniques simples d'assainissement, utilisables en milieu rural et compatibles avec la réutilisation des déchets. Une variante de la latrine vietnamienne à compostage à double compartiment, connue sous le nom de latrine familiale sèche à engrais alcalins (ou Letrina Abonera Seca Familiar, LASF), a été mise au point et elle est désormais assez bien implantée dans certaines régions rurales du Guatemala (Cacares, 1981 ; Strauss, 1986a). La latrine LASF est installée au-dessus du sol ; elle comporte deux compartiments en maçonnerie utilisés tour à tour et une simple superstructure en bambou. Seules les matières fécales sont déposées dans les compartiments, les urines étant recueillies à part. On ajoute dans la fosse au moins une fois par jour, et de préférence après chaque utilisation, des cendres provenant de poêles à bois. Lorsqu'un compartiment est plein (en général au bout de 4-6

**Fig. 3.3. Vidange d'une latrine LASF au Guatemala**  
Les excréta digérés sont ensuite répandus sur le sol



mois), il est hermétiquement fermé et l'autre est mis en service. Quand ce dernier est à nouveau plein, on vidange le premier (voir Fig. 3.3) et l'on met en réserve son contenu en vue d'un épandage sur le sol immédiatement avant la plantation ou les semailles. Les urines, une fois diluées dans l'eau, servent à l'arrosage des plantes.

Après 4-6 mois de compostage mésophile anaérobie dans le compartiment, son contenu est transformé en une matière sèche et inodore dont la consistance rappelle un sol friable. La teneur en matières organiques est de 3-10% avec 0,3-1,1% d'azote total, 150-410 mg/kg de phosphore total et 7 000-7 600 mg/kg de potassium total; le pH est élevé, de l'ordre de 9,8-11,2 par suite de l'adjonction de grandes quantités de cendres. Le nombre de coliformes est suffisamment faible, généralement inférieur à 4 000 par gramme (de matières humides) et le nombre d'œufs d'helminthe ne dépasse pas 8 500 par gramme, avec une viabilité inférieure à 30%. Cette qualité micro-biologique est considérée comme permettant une réutilisation sans risques des déchets (Zandstra, 1986).

Les agriculteurs locaux jugent utiles la latrine LASF pour deux raisons:

- elle fournit un engrais peu coûteux et facile à se procurer ainsi qu'un conditionneur de sol qui améliore «sensiblement» les rendements (on ne dispose pas de chiffres précis);
- elle constitue une installation sanitaire domestique inodore qui évite d'avoir à se soulager n'importe où, dans les champs, au hasard du moment.

De temps à autre, les quantités de cendres disponibles ne suffisent pas et il arrive qu'on les remplace, ou les complète, par de la terre ou de la chaux pour maintenir l'humidité dans le compartiment aux alentours de 50%.

Le coût de construction d'une latrine LASF s'élève à environ 70 dollars E.-U. auxquels il faut ajouter la même somme par latrine pour couvrir les dépenses de formation et de promotion. La valeur du compost produit est de 12 dollars par sac de 50 kg de sorte que, vu qu'une famille de cinq personnes produit 10 sacs par an, la dépense initiale est amortie en guère plus d'un an.

### 3.2.4 Inde

L'utilisation des gadoues en agriculture est courante en Inde, spécialement à proximité des villes, grandes ou moyennes (Strauss, 1986d).

Les gadoues des latrines à tinette sont transportées manuellement jusqu'à des stations de transfert où elles sont chargées sur des chariots ou des camions pour être amenées aux zones d'enfouissement ou livrées directement aux agriculteurs. Parfois, les gadoues sont entreposées dans des fosses avant utilisation, mais la plupart du temps elles sont employées sans aucun traitement préliminaire. Selon les cas, elles sont répandues dans les champs avant la plantation ou pendant la période de végétation. Dans certaines métropoles, par exemple le Grand Calcutta, Kanpur et Lucknow, on fabrique un compost mixte avec les gadoues et les ordures municipales. Dans la région de Calcutta, le compost est vendu aux agriculteurs au prix moyen de 2,50 roupies (0,23 dollars E.-U.) la tonne; la demande de compost est souvent élevée, si bien qu'il est fréquemment vendu avant que la maturation soit achevée. Strauss (1986d) décrit comme suit les opérations d'enfouissement et de compostage dans le Grand Calcutta :

Dans la majorité des cas, le terrain utilisé pour l'enfouissement ou le compostage est imparfaitement adapté. Il s'agit ou bien de zones déprimées qui sont inondées pendant la mousson ou d'un terrain qui ne convient pas car il est presque entièrement comblé ou entièrement entouré d'habitations, sans voie d'accès. Compostage ou enfouissement sont pratiqués de façon peu scientifique. En général, les gadoues sont déversées dans des fosses de n'importe quelle dimension, sans addition de cendres ni de boues, ni couverture. Une fois remplies, elles sont complètement exposées aux mouches, etc., qui y prolifèrent. Dans certains cas, elles ont même l'aspect d'un véritable cloaque rempli d'eau à la saison des pluies. La rigueur n'est pas plus grande dans le cas du compostage. Les déchets et les gadoues sont simplement déversés au hasard, dans n'importe quelle proportion. Dans certaines municipalités, on a même constaté que les gadoues étaient déversées dans des collections d'eau réparties sur le terrain d'enfouissement, et que l'eau servait ensuite à la baignade, aux ablutions, etc. Les travailleurs sont généralement immunisés mais ils ne bénéficient d'aucune autre protection. Les employés municipaux qui travaillent sur les terrains ainsi utilisés pour l'élimination des déchets ignorent presque tout des aspects techniques de l'opération.

Dans bon nombre de systèmes d'utilisation des excréta en Inde, il n'y a apparemment guère de contrôle de sorte que les risques effectifs pour la santé sont probablement importants (voir section 4.3). Les programmes actuels qui visent à remplacer les latrines à tinette par des cabinets à chasse à double compartiment entraîneront une réduction progressive de la quantité des gadoues fraîches utilisables en agriculture et, parallèlement, l'augmentation de la quantité de boues provenant de latrines hygiéniques.

**Fig. 3.4 Pisciculture dans des bassins d'eaux résiduaires à Calcutta, Inde**  
Le bassin expérimental fait partie d'un vaste réseau situé à l'est de la ville



### **3.3 Utilisation des excreta et des eaux résiduaires en aquaculture**

#### **3.1.1 Inde**

Il existe en Inde plus de 132 exploitations de pisciculture où l'on se sert d'eaux résiduaires comme engrais, sur une superficie totale de 120 km<sup>2</sup>; la plupart sont situés au Bengale-Occidental. La plus grande exploitation est celle des pêcheries de Calcutta en eaux résiduaires qui constitue en outre l'exemple le plus important au monde d'aquaculture utilisant des eaux résiduaires (Bose, 1944; Edwards, 1985; Strauss, 1986d).

Les eaux résiduaires brutes de Calcutta sont transportées dans deux canaux de 27 km de long jusqu'aux pêcheries des lacs saumâtres du nord et du sud, édifiées dans la zone marécageuse située à l'est de Calcutta. Les canaux alimentent un réseau complexe de canaux secondaires et tertiaires à partir desquels les eaux résiduaires viennent se déverser dans les bassins de pisciculture (voir figure 3.4). La superficie des bassins est d'environ 4 400 ha et l'on y élève le tilapia et la grande carpe indienne. Les bassins sont vidés chaque année en février afin d'être débarrassés de la vase et de la végétation puis remplis, 6 à 8 semaines plus tard, au moyen d'eaux résiduaires partiellement diluées.

Après un délai de 2-3 semaines nécessaires pour permettre le développement du phytoplancton, les bassins sont alevinés, puis alimentés lentement en eaux résiduaires chaque mois pendant 5-10 jours ; cet apport lent d'eaux résiduaires évite la désoxygénation du bassin. Les poissons atteignent une taille suffisante pour être vendus au bout de 5-6 mois, et l'on obtient chaque année dans les pêcheries du nord et du sud un rendement moyen d'environ 1 400 et 1 000 kg/ha respectivement.

Certains des bassins de pisciculture sont loués à la municipalité de Calcutta tandis que d'autres appartiennent à des particuliers et que quelques-uns sont exploités en coopérative ; ils fournissent des emplois à la population locale à raison de 7,5 personnes par hectare. Les poissons sont pêchés à l'aube, à la traîne, au moyen des filets traditionnels, puis vendus à la criée, avant d'être transportés jusqu'aux marchés de Calcutta ; à 7 heures du matin, la majeure partie de la pêche quotidienne est vendue. Les bassins de pisciculture fournissent 10-20 % des poissons consommés dans le Grand Calcutta.

Les parasitoses à trématodes ne sont pas endémiques au Bengale-Occidental et le nombre total de coliformes dans les bassins se situe entre 100 et 1 000 pour 100 ml. Cette valeur correspond à un faible risque potentiel de transmission de maladies, d'autant plus que le poisson est consommé bien cuit (généralement à la grande friture).

### 3.3.2 Indonésie

L'utilisation d'excreta comme engrais dans les bassins de pisciculture est surtout pratiquée dans la région sud-est de Java Occidental. Dans les quatre régences (zones administratives) de Bandung, Ciamis, Garut et Tasikmalaya, où cette pratique est la plus courante et où l'on compte une population de près de 8 millions de personnes, on produit chaque année environ 33 000 tonnes de poisson, principalement de la carpe commune et du tilapia de Java ou du Nil, dans des bassins qui occupent une superficie totale d'environ 10 ha (B. Abisudjak, communication personnelle).

Strauss (1986c) décrit la pisciculture pratiquée à partir d'excreta dans le village de Cikoneng qui compte 3 900 habitants et est situé à 20 km au sud-est de Bandung. Cikoneng constitue un «village de pisciculture» type: les eaux de surface naturelles provenant des petits ruisseaux et cours d'eau se déversent dans des bassins d'une superficie totale de 5 ha (la superficie moyenne est de 590 m<sup>2</sup> par bassin), de même que les eaux locales de ruissellement et les eaux provenant des rizières qui y sont acheminées au moyen de caniveaux et canalisations en bambou. Les bassins sont interconnectés et l'eau s'écoule des bassins situés le plus haut vers les bassins en contre bas. Ils sont

**Fig. 3.5 Latrine surélevée à Java, Indonésie**

Les excreta tombent dans le bassin de pisciculture et contribuent à l'enrichir. Les tuyaux en bambou du premier plan apportent l'eau d'autres bassins pour les ablutions et le lavage.



utilisés pour les ablutions et le lavage par toutes les familles, sauf les plus riches qui disposent d'un puits personnel. Les latrines sont installées en surplomb au-dessus des bassins (figure 3.5), de sorte que les excreta servent directement d'engrais pour les poissons. Certaines familles emploient aussi comme engrais du son de riz et des déjections de volaille. Les bassins sont asséchés une fois par an et tous les poissons sont alors pêchés et vendus. Le rendement annuel en poisson est de l'ordre de 1 600-2 800 kg/ha. La vase est vidangée et employée comme conditionneur de sol et comme engrais dans les rizières locales. En outre, des poissons sont pêchés une fois par semaine pour la consommation locale, après cuisson. Dans certains bassins, on fait aussi pousser de l'ipoméée, consommée cuite comme légume. Les maladies diarrhéiques ne posent pas d'importants problèmes de santé dans le village puisqu'on en observe seulement un épisode environ par personne et par an. Le nombre de coliformes fécaux dans les bassins de pisciculture se situe entre  $10^4$  et  $10^5$  pour 100 ml. Les parasitoses à trématodes (distomatose hépatique d'Extrême-Orient, distomatose intestinale du Sud-Est asiatique et schistosomiase) sont inconnues. Apparemment, l'utilisation d'excreta bruts comme engrais en pisciculture ne provoque pas semble-t-il, d'augmentation significative de la transmission des maladies associées aux excreta.

# 4

## Considérations de santé publique

Dans les pays en développement, les excréta et les eaux résiduaires sont une cause fréquente de maladies du fait de leur teneur élevée en agents pathogènes. Il importe de bien connaître les voies de transmission de ces maladies et les facteurs de risque pour que la conception, l'exploitation ou la modification des systèmes de recyclage n'entraînent pas une intensification de la transmission.

### 4.1 Infections liées aux excréta

Il s'agit d'infections transmissibles dues à des agents pathogènes — virus, bactéries, protozoaires ou helminthes — excrétés par les sujets infectés ou parasités et qui finissent par se transmettre à d'autres personnes, la porte d'entrée étant soit la bouche (par exemple lors de la consommation de légumes contaminés) soit la peau (dans le cas de l'ankylostomiase et de la schistosomiase). On connaît 30 infections liées aux excréta qui sont suffisamment importantes pour constituer un problème de santé publique. Il est commode de les répartir en cinq catégories selon les propriétés des agents pathogènes et selon leurs modalités de transmission dans l'environnement (voir tableau 4.1).

Les infections de la catégorie I sont provoquées par des virus et des protozoaires ainsi que par deux helminthes, *Enterobius vermicularis* (oxyure) et *Hymenolepis nana* (ténia nain). Ces agents sont infectieux dès qu'ils sont excrétés (pas de latence) et leur dose infectieuse médiane est faible. La transmission intervient principalement dans l'environnement domestique immédiat, spécialement quand l'hygiène personnelle laisse à désirer, mais certains virus et protozoaires excrétés survivent parfois assez longtemps pour que le recyclage des excréta et des eaux usées pose un problème de santé (voir section 4.2).

Les agents pathogènes responsables des infections de la catégorie II sont des bactéries. Comme les agents de la catégorie I, elles sont infectieuses dès leur excrétion. Elles sont modérément persistantes et peuvent se multiplier hors de l'hôte, par exemple dans les aliments, notamment le lait. Très fréquemment transmises dans l'environnement domestique immédiat, elles peuvent aussi supporter une transmission

Tableau 4.1 Classification écologique des affections dues à des agents excrétés

Catégorie et caractéristiques épidémiologiques	Affection	Modalités de transmission dans l'environnement	Principales mesures de lutte
I. Pas de latence; dose infectieuse faible	Amibiase Balantidiose Oxyurose Entéroviroses Giardiase Téniase infantile des régions chaudes Hépatite A Rotaviroses	Transmission inter-individuelle Transmission domestique	Approvisionnement en eau domestique Education pour la santé Amélioration des logements Installation de toilettes
II. Pas de latence; dose infectieuse moyenne ou élevée; persistance modérée; capacité de prolifération	Infection à <i>Campylobacter</i> Choléra Infection à <i>Escherichia coli</i> pathogène Salmonellose Shigellose Typhoïde Yersinioses	Transmission inter-individuelle Transmission domestique Eau Cultures	Approvisionnement en eau domestique Education pour la santé Amélioration du logement Installation de toilettes Traitement des excréta avant évacuation ou réutilisation
III. Période de latence et persistance; aucun hôte intermédiaire	Ascaridiase Ankylostomiase Anguillulose Trichocéphalose	Cours des habitations Champs Cultures	Installation de toilettes Traitement des excréta avant épandage sur le sol

<p>IV. Période de latence et persistance ; hôte intermédiaire constitué par les bovins ou les porcs</p>	<p>Téniaise</p>	<p>Cours des habitations Champs Fourrage Eau</p>	<p>Installation de toilettes Traitement des excréta avant épandage sur le sol Cuisson, inspection de la viande</p>
<p>V. Période de latence et persistance ; existence d'un ou plusieurs hôtes aquatiques intermédiaires</p>	<p>Distomatose d'Extrême-Orient Bothriocéphalose Distomatose hépatique cosmopolite à fasciola Distomatose du Sud-Est asiatique Distomatose intestinale de l'Inde Distomatose intestinale du Delta du Nil Distomatose intestinale du Nord-Est asiatique Distomatose hépatique euro-asiatique Distomatose pulmonaire Schistosomiase (bilharziose)</p>	<p>Installation de toilettes Traitement des excréta avant épandage Destruction des réservoirs animaux Destruction des hôtes intermédiaires Cuisson des plantes aquatiques et du poisson Réduction des contacts avec l'eau</p>	

Source : Feachem et al. (1983).

selon une voie plus longue, d'où un danger réel pour la santé en cas d'utilisation des excreta et des eaux usées. On connaît, par exemple des cas bien documentés d'épidémie de choléra provoqués par l'utilisation d'eaux résiduaires non traitées pour l'irrigation de cultures maraîchères.

Les infestations des catégories III à V sont provoquées par des helminthes qui ne peuvent parasiter l'homme qu'un certain temps après leur excrétion. Pendant cette période de latence, ils sont présents dans le sol, dans l'eau ou chez un hôte intermédiaire. La plupart des helminthes survivent quelques semaines à plusieurs années dans l'environnement. La réutilisation des excreta et des eaux résiduaires a une part importante dans la transmission de bon nombre de ces parasites; pour en limiter l'extension, un traitement préalable efficace des excreta ainsi que des eaux résiduaires constitue une bonne méthode (voir section 7).

Les parasitoses de la catégorie III sont provoquées par des nématodes intestinaux transmis par le sol et qui n'ont besoin d'aucun hôte intermédiaire. Les plus importants d'entre eux sont l'ascaris (*Ascaris lumbricoides*), l'ankylostome (*Ancylostoma dudoenale* et *Necator americanus*) et le trichocéphale (*Trichuris trichiura*). Tous se transmettent facilement lors de l'utilisation en agriculture d'excreta et d'eaux résiduaires bruts ou insuffisamment traités; en fait, de tous les agents pathogènes excrétés, ce sont ceux qui constituent le principal danger lors de la réutilisation en agriculture (voir section 4.3).

La catégorie IV regroupe les parasitoses provoquées par le ténia du bœuf (ténia inerme) et le ténia du porc (ténia armé) (*Taenia saginata* et *T. solium*, respectivement). Pour que des œufs viables puissent être transmis, il faut qu'ils soient ingérés par un bovin ou un porc; une voie de transmission possible consiste dans l'utilisation d'eaux résiduaires pour l'irrigation des pâturages.

Les maladies de la catégorie V sont toutes des helminthiases à transmission hydrique. Les parasites en cause comportent un ou deux hôtes intermédiaires aquatiques obligatoires, dont le premier est un gastéropode dans lequel l'helminthe se reproduit abondamment selon le mode asexué, et le second (éventuellement) soit un poisson, soit un macrophyte aquatique. Bon nombre de ces helminthes ont une aire de distribution géographique limitée (voir Feachem et al., 1983) et c'est uniquement dans les régions d'endémie que la transmission est favorisée par l'emploi, en aquaculture, d'excreta et d'eaux résiduaires bruts ou insuffisamment traités et, parallèlement, par l'habitude de consommer les poissons et certaines plantes aquatiques crus ou mal cuits. L'utilisation des déchets pour l'irrigation en agriculture ne pose pas problème dans ce cas, si ce n'est que, comme toute autre méthode d'irrigation, elle facilite la transmission de la schistosomiase.

## 4.2 Risques pour la santé

### 4.2.1. Risques potentiels et effectifs

Pour que l'utilisation d'excreta et d'eaux résiduaires en agriculture ou aquaculture fasse peser un risque *effectif* sur la santé, il faut que *toutes* les conditions ci-dessous soient réunies :

- a) pour un agent pathogène excrété, la dose infectieuse est atteinte *soit* au moment où cet agent est déversé dans un champ ou dans un bassin, *soit* à la suite de sa multiplication dans ce champ ou ce bassin ;
- b) la dose infectieuse atteint un hôte humain ;
- c) l'hôte est effectivement infecté ;
- d) l'infection détermine une maladie ou permet la poursuite de la transmission.

Le risque demeure *potentiel* quand seule est remplie la condition a), éventuellement accompagnée des conditions b) ou b) et c), mais à l'exclusion de la condition d).

Même lorsqu'il existe un risque effectif, l'utilisation d'excreta ou d'eaux résiduaires en agriculture ou en aquaculture, ne compte pour la santé publique que s'il s'ensuit une augmentation mesurable de l'incidence ou de la prévalence d'une maladie ou de l'intensité d'une infection. Une étude épidémiologique est nécessaire pour voir si tel est ou non le cas (voir section 4.3).

La suite d'événements nécessaires pour qu'un risque devienne effectif est résumée sur la figure 4.1, qui indique quelles sont les caractéristiques et les interactions agent pathogène-hôte qui interviennent à chacun des stades. Si l'enchaînement est interrompu en un point quelconque, les risques potentiels ne peuvent pas se combiner de façon à constituer un risque effectif. Telle est l'idée générale qui préside aux diverses méthodes de protection de la santé publique qui font l'objet de la section 7.

### 4.2.2 Facteurs de risque

Il est abondamment démontré (Feachem et al., 1983) que les excreta et les eaux résiduaires peuvent contenir — et contiennent en général, spécialement dans les pays en développement — de fortes concentrations d'agents pathogènes, dont bon nombre peuvent y survivre pen-

**Fig. 4.1** Caractéristiques des agents pathogènes et des hôtes qui influent sur la suite d'événements qui se produisent entre l'apparition d'un agent pathogène dans les excreta ou les eaux résiduaires et la survenue décelable d'une maladie humaine attribuable à leur utilisation

#### **CHARGE EXCRÉTÉE**

- latence
- prolifération
- persistance
- survie au traitement

#### **ÉPANDAGE D'UNE DOSE INFECTIEUSE SUR LE SOL OU DANS L'EAU**

- persistance
- hôte intermédiaire
- type de technique de réutilisation des déchets
- modalités de l'exposition humaine

#### **RÉCEPTION PAR L'HÔTE HUMAIN D'UNE DOSE INFECTIEUSE**

- comportement humain
- caractéristique de l'immunité humaine

#### **RISQUES D'INFECTION ET DE MALADIE**

- existence d'autres voies de transmission

#### **IMPORTANCE POUR LA SANTÉ PUBLIQUE DE L'UTILISATION DES EXCRETA ET DES EAUX RÉSIDUAIRES**

D'après Blum & Feachem (1985) ; reproduit avec l'autorisation du Centre international de référence pour l'évacuation des déchets.

dant un certain temps et résistent en outre à la plupart des procédés classiques de traitement. C'est ainsi qu'ils peuvent parvenir jusqu'à un champ ou à un bassin de pisciculture en nombre suffisamment élevé pour qu'une infection humaine soit théoriquement possible. Le seul remède est de les éliminer ou de les tuer avant. Cependant, même dans le cas contraire, une infection n'est possible que si un hôte sensible reçoit une dose infectieuse, ce qui dépend des facteurs suivants (Blum & Feachem, 1985):

- durée de survie de l'agent pathogène dans le sol, dans les cultures, dans les poissons ou dans l'eau;
- présence, pour les infections des catégories IV et V, de l'hôte ou des hôtes intermédiaires nécessaires;

- modalités et fréquence des épandages d'excreta ou d'eaux résiduaires;
- nature des cultures sur lesquelles les excreta ou eaux résiduaires sont répandus;
- modalités de l'exposition de l'hôte humain au véhicule contaminé — sol, eau, cultures ou poissons.

## Survie des agents pathogènes

Feachem et al. (1983) ainsi que Strauss (1985) ont publié deux mises au point sur la durée de survie des agents pathogènes excrétés dans le sol et à la surface des plantes cultivées, après avoir procédé au dépouillement d'une abondante littérature sur la question. Les valeurs indiquées sont très inégales car elles reflètent à la fois des variations entre souches, la différence des conditions climatiques, ainsi que la diversité des techniques d'analyse. Néanmoins, on peut résumer les

**Tableau 4.2 Durée de survie à 20-30 °C de quelques agents pathogènes excrétés dans le sol et à la surface des plantes cultivées**

Agent pathogène	Durée de survie (jours)	
	Dans le sol	Sur les plantes cultivées
Virus		
Entérovirus <sup>a</sup>	< 100 mais généralement < 20	< 60 mais généralement < 15
Bactéries		
Coliformes fécaux	< 70 mais généralement < 20	< 30 mais généralement < 15
Salmonelles	< 70 mais généralement < 20	< 30 mais généralement < 15
<i>Vibrio cholerae</i>	< 20 mais généralement < 10	< 5 Mais généralement < 2
Protozoaires		
Kystes d' <i>Entamoeba histolytica</i>	< 20 mais généralement < 10	< 10 mais généralement < 2
Helminthes		
Œufs d' <i>Ascaris lumbricoides</i>	De nombreux mois	< 60 mais généralement < 30
Larves d'ankylostome	< 90 mais généralement < 30	< 30 mais généralement < 10
Œufs de <i>Taenia saginata</i>	De nombreux mois	< 60 mais généralement < 30
Œufs de <i>Trichuris trichiura</i>	De nombreux mois	< 60 mais généralement < 30

<sup>a</sup> Genre de virus comprenant les poliovirus, les échovirus et les virus Coxackie.

D'après Feachem et al. (1983); reproduit avec l'autorisation de la Banque mondiale.

connaissances actuelles sur la durée de survie des agents pathogènes dans le sol et les cultures, dans les climats chauds (20-30 °C) (tableau 4.2). La durée de survie des agents pathogènes dans les bassins engraisés à l'aide d'excreta ou d'eaux résiduaires est sensiblement la même que dans les bassins de stabilisation des installations de traitement (voir section 7.2). On ne peut escompter une diminution du nombre de bactéries et de virus que dans la proportion de 10 à 1 000 fois, selon la dilution, la durée de rétention dans l'installation et les conditions climatiques; les œufs d'helminthe et les kystes de protozoaire se déposent au fond du bassin où ils peuvent rester longtemps viables.

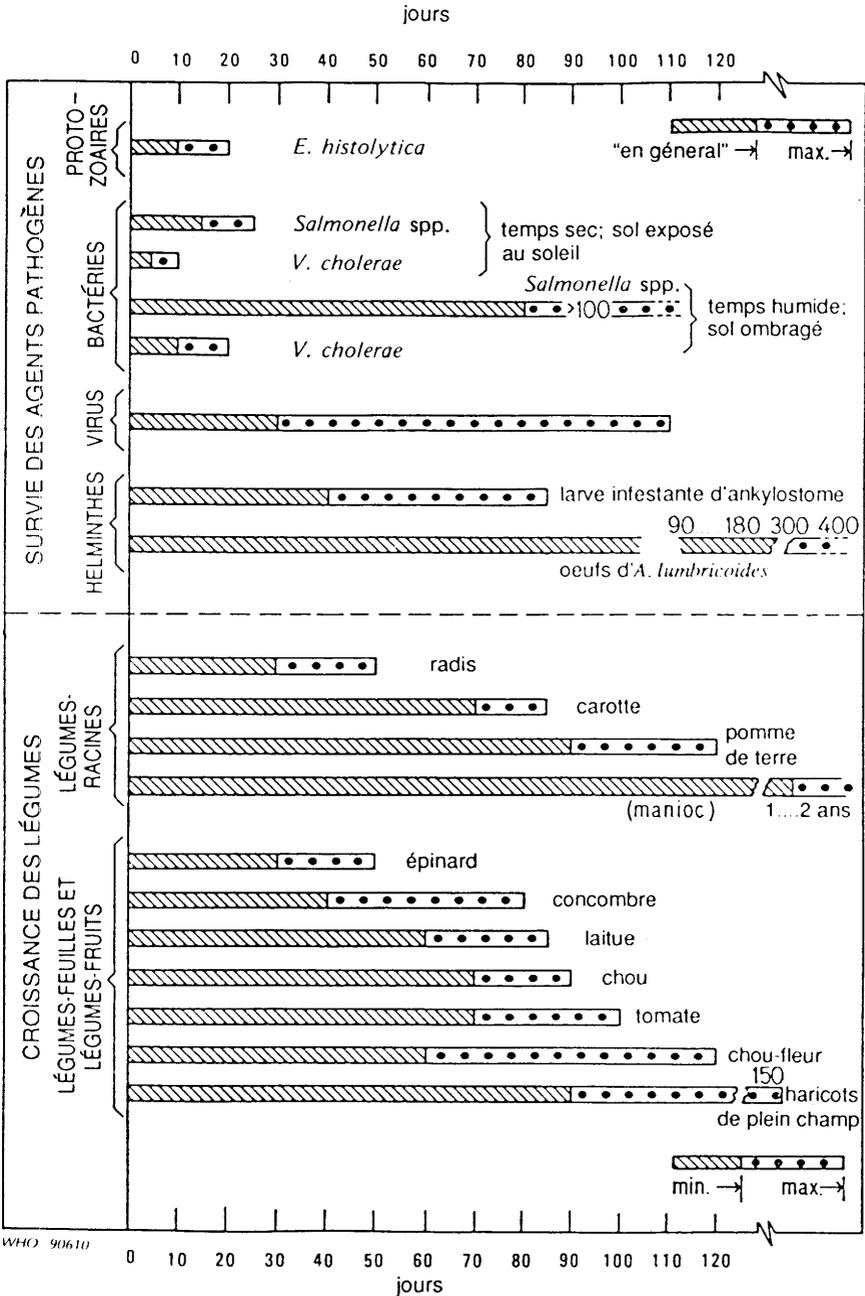
Les observations montrent que la quasi-totalité des agents pathogènes excrétés survivent suffisamment longtemps dans le sol et dans les bassins pour faire courir un risque au personnel des exploitations agricoles ou piscicoles (voir Fig. 4.2). A la surface des plantes cultivées, la survie des agents pathogènes est beaucoup moins longue que dans le sol car ils sont moins bien protégés contre la lumière solaire intense et la dessiccation. Pourtant, dans certains cas, leur survie peut être suffisamment longue pour créer un risque potentiel lors de la récolte et de la consommation du produit, spécialement si la durée est supérieure à celle de la période de végétation des cultures (principalement des légumes (Fig. 4.3). La situation est analogue pour les personnes qui manipulent ou consomment des poissons ou des macrophytes aquatiques.

## Hôtes intermédiaires

L'irrigation de pâturages avec des eaux résiduaires contenant des œufs viables de *Taenia saginata* ne peut causer de cysticercose que si on laisse paître les bovins alors que les œufs sont encore viables. Il est donc recommandé, et obligatoire dans certains pays, de laisser s'écouler au moins 14 jours entre l'irrigation et le début de la pâture. L'éducation des agriculteurs et l'application des règlements constituent des mesures de lutte complémentaires indispensables. Dans le cas du ténia du porc, les animaux ne sont effectivement parasités que s'ils ont directement accès à des excréta humains (qu'ils n'hésitent pas à manger), de sorte que l'utilisation d'excreta comme engrais ou d'eaux résiduaires pour l'irrigation ne détermine pas, en général, d'augmentation appréciable de la transmission.

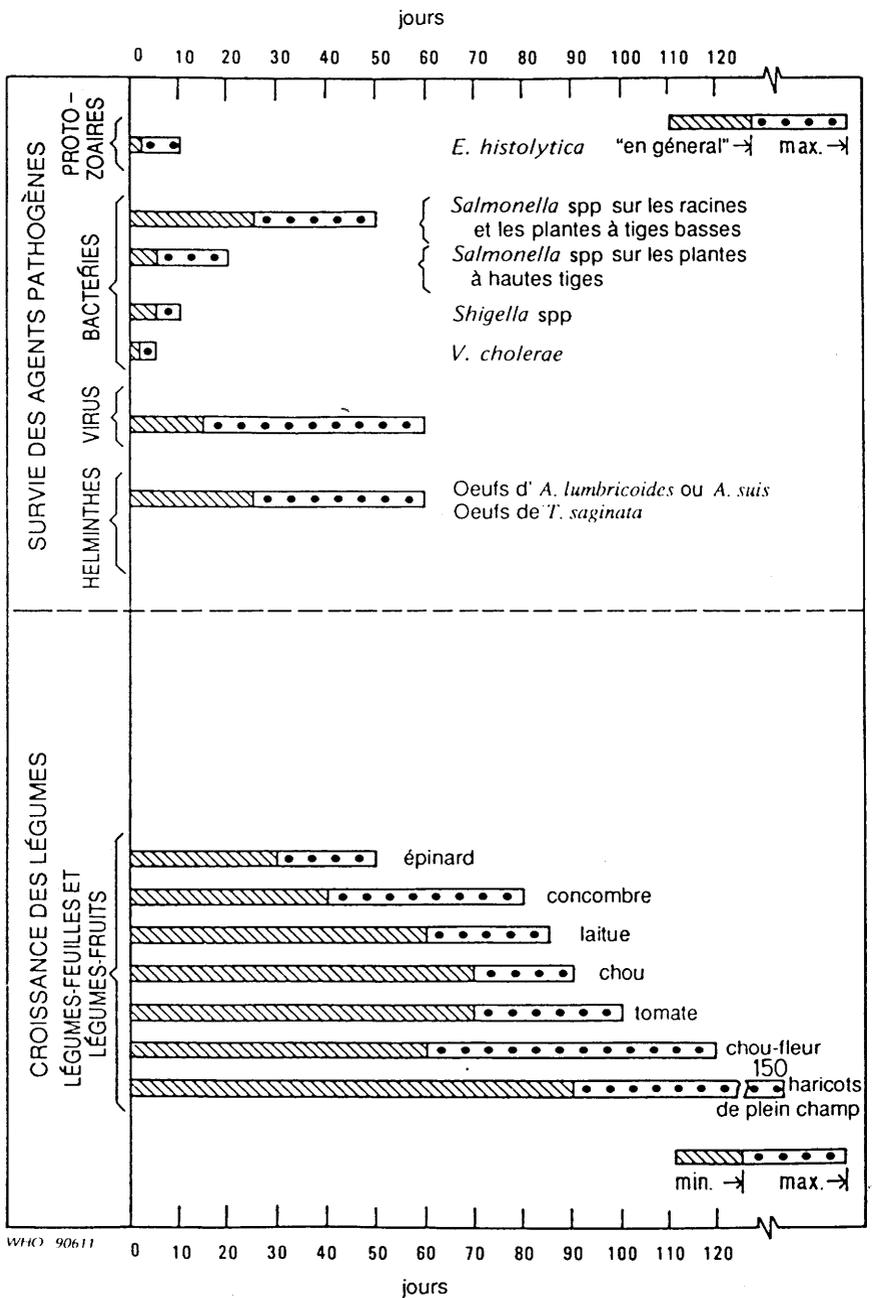
Dans le cas des parasitoses de la catégorie V, l'hôte aquatique intermédiaire secondaire — poisson ou plante aquatique — constitue le produit que l'on cherche à obtenir par aquaculture, et l'infestation n'est possible que lorsqu'un œuf viable parvient dans le bassin et à condition qu'il y trouve un gastéropode hôte convenable et que l'hôte

**Fig. 4.2. Comparaison entre la durée de survie des agents pathogènes dans le sol et la durée de la période de croissance des légumes dans les pays chauds**



Reproduit avec l'autorisation de Strauss (1985).

Fig. 4.3 Comparaison entre la durée de survie des agents pathogènes sur les plantes cultivées et la durée de croissance des légumes dans les climats chauds



WHO 90611

Reproduit avec l'autorisation de Strauss (1985).

secondaire soit consommé cru ou mal cuit. Ces «maladies de l'aquaculture» ne s'observent que dans certaines régions géographiques limitées d'Asie où les trois conditions ci-dessus sont réunies (voir section 4.4.3).

## **Modalités et fréquence des épandages**

La façon dont les excréta ou les eaux résiduaires sont répandus sur le sol ou dans les bassins, la durée entre deux épandages successifs et la durée entre le dernier épandage et la récolte sont autant de facteurs qui influent sur le risque de contamination des cultures et de dispersion des agents pathogènes dans l'environnement. Les méthodes permettant de réduire ces effets au minimum sont examinées à la section 7.4.

## **Nature des cultures et type d'exposition**

Les produits agricoles et aquicoles destinés à la consommation humaine font peser un risque potentiel sur le personnel d'exploitation, sur les ouvriers qui manipulent des produits et sur les consommateurs. Dans le cas des cultures fourragères, ce risque pèse sur le personnel d'exploitation et sur les consommateurs de la viande et du lait des animaux nourris avec le fourrage; dans le cas de produits industriels (par exemple la betterave à sucre, la farine de poisson), seuls sont exposés les ouvriers employés à la production ou à la manipulation des produits. Dans le cas de l'irrigation par aspersion, une autre catégorie de personnes sont exposées, à savoir celles qui habitent à proximité des champs irrigués et qui sont exposées à un risque potentiel du fait de la présence d'agents pathogènes dans les gouttelettes d'aérosol dispersées par le vent.

Le risque le plus important est associé aux plantes qui sont consommées crues, par exemple en salade, spécialement lorsqu'il s'agit de légumes-racines (par exemple des radis) ou de plantes à végétation basse (par exemple des laitues). La durée de survie des agents pathogènes peut dépasser la durée de la période de végétation de sorte que la contamination est extrêmement probable, sauf si les excréta ou les eaux résiduaires subissent un traitement poussé (voir section 7.2).

## **Immunité de l'hôte**

Une immunité appréciable ne s'installe chez l'hôte qu'à l'égard des maladies à virus et de certaines maladies bactériennes (comme la typhoïde). L'immunité a son maximum d'efficacité dans le cas des

maladies virales où l'infection est très courante à un âge précoce (même dans les collectivités où l'hygiène corporelle est rigoureuse), de sorte que la population adulte est immunisée dans une forte proportion vis-à-vis de la maladie et, souvent, de l'infection également.

## **Comportement humain**

Une hygiène corporelle et alimentaire satisfaisantes et, dans le cas de l'exposition professionnelle, le port de vêtements ou de chaussures protecteurs peuvent mettre à l'abri de l'infection, même dans des circonstances où le risque serait très important faute de ces précautions. L'éducation pour la santé est indispensable pour faire évoluer certains types de comportement, mais il s'agit d'une solution de longue haleine et qui peut être totalement inefficace face à certaines préférences culturelles, par exemple l'habitude de manger le poisson cru. Les aspects socioculturels liés à l'utilisation des excreta et des eaux résiduaires sont étudiés plus à fond à la section 5.

## **Existence d'autres voies de transmission des agents pathogènes**

Les facteurs exposés ci-dessus déterminent les risques potentiels pour la santé qui découlent de l'utilisation des excreta et des eaux résiduaires. L'importance relative de ces risques dépend de l'existence d'autres voies par lesquelles les agents pathogènes excrétés peuvent atteindre les personnes exposées. Quand ces autres voies sont nombreuses, il se peut que l'utilisation des excreta et des eaux usées n'entraîne pas de risques supplémentaires appréciables. A l'inverse, s'il n'existe aucune autre voie, cette pratique est entièrement responsable du risque ainsi créé.

Ces deux situations peuvent être illustrées par la comparaison des habitants d'une grande ville moderne et riche et des habitants d'un village traditionnel pauvre qui consomment les uns et les autres des légumes pour lesquels on utilise comme engrais les excreta des villageois. A supposer que l'hygiène corporelle et l'assainissement soient excellents dans le cas de la ville mais médiocres dans celui du village, l'unique mode d'exposition (ou presque) des citadins aux agents pathogènes excrétés est constitué par la consommation des légumes. En revanche, pour les villageois, c'est seulement un mode de transmission parmi de nombreux autres, et pas forcément le plus important, vu que l'importance de la contamination fécale dans leur environnement immédiat devrait *a priori* entraîner une exposition directe beaucoup plus poussée et donner lieu, par conséquent, à des infections et

à des maladies. Cela étant, limiter la consommation de légumes en ville constituerait une méthode préventive efficace, alors que des mesures semblables dans le cadre du village n'auraient probablement guère d'effet sur le taux de transmission des maladies.

### **4.3 Observations épidémiologiques**

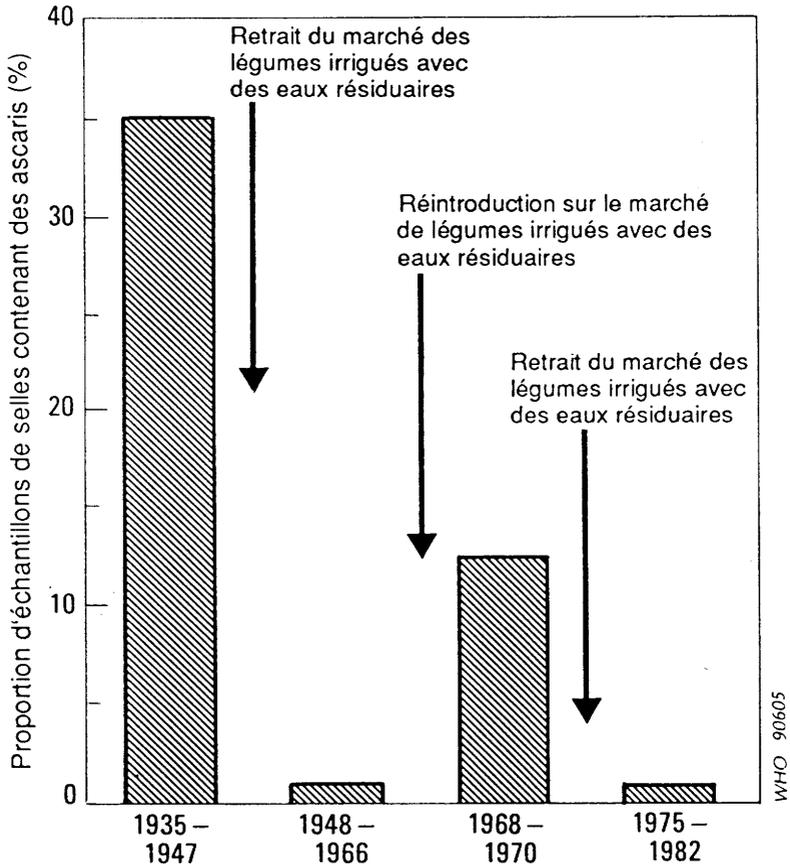
L'impact réel sur la santé publique de l'utilisation d'excreta ou d'eaux résiduaires ne peut s'apprécier que par la mise en évidence éventuelle d'une augmentation mesurable de l'incidence, de la prévalence ou de la gravité de certaines maladies par rapport à la période où cette pratique n'avait pas cours. Quand tel n'est pas le cas, c'est que la pratique n'a qu'une importance négligeable en matière de santé publique. Lorsqu'on observe au contraire une augmentation, il faut faire un bilan en tenant compte, à côté de cette conséquence néfaste de la nouvelle pratique, des effets bénéfiques qu'elle peut avoir sur la santé publique. Ces derniers consistent, par exemple, dans l'amélioration de l'état nutritionnel de la collectivité en cause qui résulte d'une nourriture plus abondante.

Une étude épidémiologique est nécessaire pour établir si l'utilisation d'excreta ou d'eaux résiduaires dans un contexte donné entraîne une augmentation mesurable de l'incidence, de la prévalence ou de la gravité de telle ou telle maladie. Les études de ce type soulèvent des problèmes de méthodologie mais elles sont irremplaçables s'agissant de déterminer les dangers réels — et non simplement potentiels — pour la santé. Bien qu'il n'existe que relativement peu d'études épidémiologiques bien conçues sur l'utilisation des excreta et des eaux résiduaires, on peut dégager certaines conclusions des observations actuellement disponibles — et plus facilement dans le cas de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires qui est mieux connu que dans celui de l'utilisation des excreta en agriculture ou des excreta et eaux résiduaires en aquaculture, pratiques au sujet desquelles on est moins bien renseigné.

#### **4.3.1 Utilisation des eaux résiduaires en agriculture**

Shuval et al. (1986) ont procédé au recensement rigoureux de toutes les études épidémiologiques conduites sur l'utilisation des eaux résiduaires en agriculture. Les principales conclusions de leur mise au point peuvent être résumées comme suit :

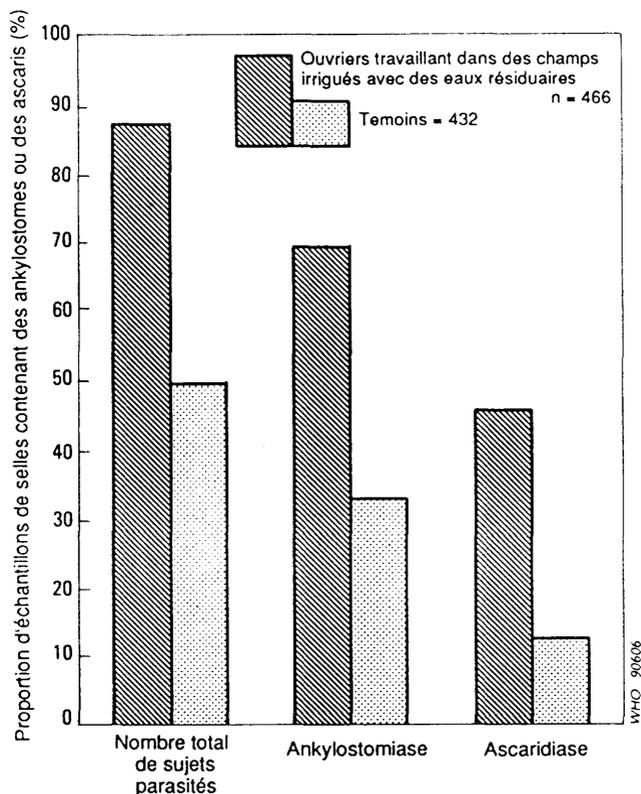
**Fig. 4.4 Relation entre la proportion des échantillons de selles contenant des ascaris dans la population de Jérusalem-ouest et la présence, sur le marché, de légumes et de salades provenant de cultures irriguées au moyen d'eaux résiduaires brutes, Jérusalem, 1935-1982**



D'après Shuval et al. (1986), reproduit avec l'autorisation de la Banque mondiale.

- L'irrigation des cultures au moyen d'eaux résiduaires non traitées entraîne une augmentation appréciable de parasitoses à nématodes, tant chez les consommateurs (figure 4.4) que chez les exploitants agricoles (figure 4.5); ces derniers risquent, spécialement lorsqu'ils travaillent nu-pieds dans les champs, de contracter une infection plus intense, en particulier dans le cas de l'ankylostomiase, que leurs collègues qui ne travaillent pas dans des champs irrigués de cette manière.

**Fig. 4.5** Prévalence de l'ankylostomiase et de l'ascaridiase chez des ouvriers travaillant dans des champs irrigués avec des eaux résiduaires et chez des groupes témoins, dans diverses régions de l'Inde

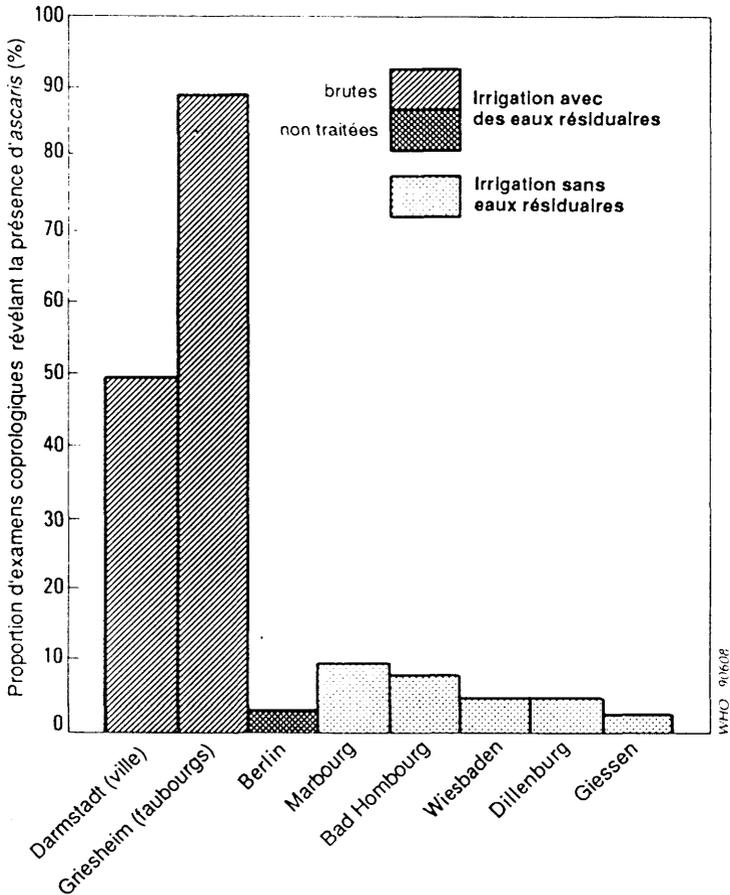


D'après Shuval et al. (1986), reproduit avec l'autorisation de la Banque mondiale.

- L'irrigation au moyen d'eaux résiduaires traitées<sup>1</sup> n'entraîne pas d'augmentation du nombre de cas de nématodoses intestinales, ni chez le personnel d'exploitation, ni chez les consommateurs (figure 4.6).
- Le choléra, et sans doute aussi la typhoïde, sont facilement transmissibles par les légumes arrosés au moyen d'eaux résiduaires non traitées (voir Encadré 4.1).

<sup>1</sup> Par « eaux résiduaires traitées », on vise ici des eaux soumises à un traitement classique — sédimentation primaire, traitement biologique (filtres percolateurs ou procédé des boues activées) et sédimentation secondaire. Les effluents des stations de traitement classiques ne contiennent qu'un petit nombre d'œufs d'helminthes ou de kystes de protozoaire mais elles sont riches en bactéries et en virus d'origine fécale (voir section 7).

**Fig. 4.6 Irrigation de légumes avec des eaux résiduaires et prévalence de l'ascaridiasse à Berlin (ouest) et dans un certain nombre de villes de République fédérale d'Allemagne, en 1949**



A Darmstadt, on se servait d'eaux résiduaires brutes pour l'irrigation et à Berlin (Ouest) d'eaux résiduaires traitées selon le procédé classique (sédimentation primaire, biofiltration et sédimentation secondaire).

D'après Shuval et al. (1986), reproduit avec l'autorisation de la Banque mondiale.

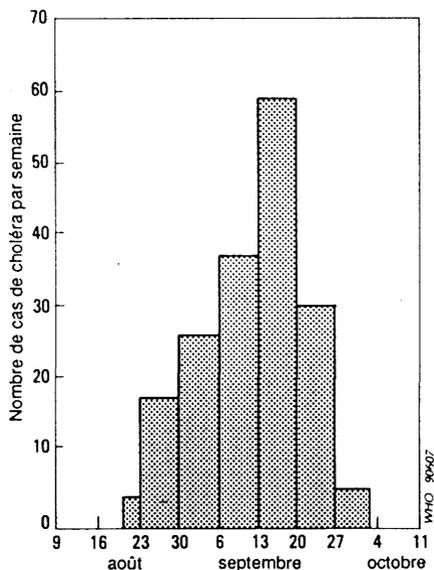
- Le bétail mis à paître dans des prés irrigués au moyen d'eaux résiduaires brutes risque d'être contaminé par *Cysticercus bovis* (stade larvaire du ténia du bœuf, *Taenia saginata*), mais, d'après les observations, le risque effectif d'infestation humaine semble minime.
- Il ne semble pas qu'il y ait trop de craintes à avoir pour la santé des personnes qui vivent à proximité de champs irrigués avec des eaux résiduaires brutes, qu'il s'agisse d'une contamination directe,

### Encadré 4.1 L'épidémie de choléra de Jérusalem, en 1970

L'épidémie de choléra qui a éclaté à Jérusalem en août 1970 et s'est poursuivie en septembre a été la première occasion d'observations épidémiologiques fiables témoignant de la transmission de bactéries infectieuses excrétées par des légumes irrigués avec des eaux résiduaires.

Pendant l'été de 1970, de nombreux cas de choléra ont été signalés dans les pays limitrophes d'Israël. Trois cas se sont déclarés à Jérusalem le 20 août. L'épidémie a atteint son maximum, avec 59 cas, pendant la semaine du 13 au 19 septembre. Tous les cas aigus connus ont donné lieu à une enquête approfondie : rares ont été les cas confirmés de contact secondaire — aucune affection n'a été découverte chez les autres membres de la famille ou chez les compagnons de travail — et l'épidémie ne s'est pas propagée à d'autres villes du pays, alors, pourtant, que la ville de Jérusalem restait normalement ouverte au commerce et au tourisme. Il semble donc que l'épidémie n'avait qu'une seule et unique source.

Les examens bactériologiques de routine de l'eau d'adduction de la ville montraient que le nombre de coliformes était nul ; le lait et les produits laitiers étaient systématiquement pasteurisés dans des conditions rigoureuses de contrôle de qualité en laboratoire ; la ville bénéficiait d'un bon assainissement général — avec un très petit nombre de cas d'excreta non recouverts et une faible population de mouches domestiques.



Distribution hebdomadaire des cas de choléra à Jérusalem, en août-septembre 1970 ( $n = 176$ ). L'irrigation des légumes et des salades avec des eaux résiduaires brutes a été interdite par les autorités au cours de la semaine commencée le 13 septembre.

août

septembre

octobre

Nombre de cas de choléra par semaine

**(Encadré 4.1 suite)**

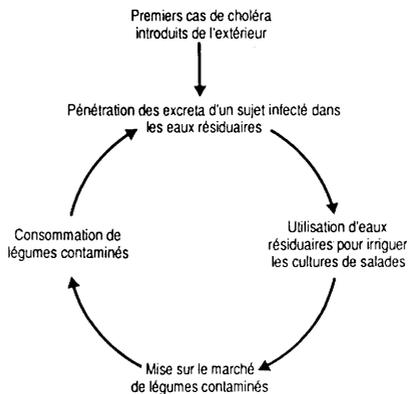
L'origine commune la plus probable se trouvait apparemment dans les salades et les légumes cultivés dans les vallées du Cédron et du Refaim proches de Jérusalem, dans des champs irrigués avec les eaux résiduaires de la ville.

L'achat de ces légumes ou salades a souvent été mentionné par les personnes tombées malades et, dans plusieurs cas, les seuls membres de la famille tombés malades étaient l'un de ceux qui en avaient mangé.

Un programme intensif d'échantillonnage et d'analyse a été entrepris pour déceler la présence de *Vibrio cholerae* dans les eaux résiduaires des principaux exutoires de la ville, dans les sols des champs irrigués avec des eaux résiduaires et dans les légumes cultivés dans ces mêmes champs ou vendus sur les marchés locaux. Au cours de l'épidémie, la présence de *V. cholerae* a été découverte dans 18% des échantillons d'eaux résiduaires, et les examens sérologiques ont montré que les isollements de *V. cholerae* appartenaient aux mêmes sérotypes que celui qu'on observait dans la très grande majorité des cas typiques; aucun vibron n'a été découvert dans les eaux résiduaires après l'épidémie. Des vibrions et des phages ont également été mis en évidence dans le sol irrigué avec des eaux résiduaires et sur les légumes cultivés dans les champs correspondants ou en vente sur les marchés locaux. Les examens ultérieurs de laboratoire ont montré que *V. cholerae* peut survivre suffisamment longtemps dans les eaux résiduaires, sur le sol et à la surface des plantes pour rendre possible ce type de transmission.

Les autorités sanitaires israéliennes ont ordonné l'arrêt de la culture et de la commercialisation des plantes irriguées avec des eaux résiduaires; les plantes déjà récoltées ont été saisies et celles encore sur pied détruites du 15 au 20 septembre. L'épidémie a rapidement perdu de son intensité, le dernier cas clinique étant décelé environ 12 jours plus tard.

Il est clair aujourd'hui que l'épidémie de choléra qui a sévi en 1970 à Jérusalem avait pour origine des cas cliniques ou infra-cliniques importés mais que le principal mécanisme de propagation secondaire de la maladie a consisté dans la pratique consistant à irriguer les cultures maraîchères avec des eaux résiduaires.



Cycle théorique de transmission de *Vibrio cholerae* aux résidents de Jérusalem par les premiers porteurs venus de l'extérieur de la ville, par l'intermédiaire de légumes irrigués au moyen d'eaux résiduaires.

Source: Shuval et al. (1986).

par contact avec le sol, ou indirecte, par contact avec les ouvriers agricoles. Dans les collectivités où l'hygiène corporelle est rigoureuse, les conséquences néfastes se limitent en général à une fréquence accrue des cas de gastro-entérite bénigne, souvent d'origine virale, encore qu'on puisse également observer des infections bactériennes plus nombreuses.

- L'irrigation par aspersion au moyen d'eaux résiduaires traitées<sup>1</sup> risque de faciliter la transmission, dans les aérosols, des virus excrétés, mais la transmission de maladies est normalement rare en pratique car la plupart des sujets sont fortement immunisés contre les maladies virales endémiques dans leur communauté.

Il est clair, d'après ces observations que l'utilisation d'eaux résiduaires non traitées pour l'irrigation des cultures entraîne un risque effectif important en présence de bactéries et de nématodes intestinaux et un risque faible ou nul en présence de virus (voir tableau 4.3). Le risque effectif de protozoose est encore mal connu — faute d'observations épidémiologiques suffisamment nombreuses — mais aucune étude n'a montré qu'il soit majoré pour la réutilisation de déchets. Il est non moins certain que le traitement des eaux résiduaires est très efficace pour protéger la santé publique.

### 4.3.2 Utilisation des excreta en agriculture

Blum & Feachem (1985) ont publié une mise au point après avoir examiné en détail les observations épidémiologiques publiées sur la transmission de maladies associée à l'utilisation d'excreta comme engrais. Bon nombre des études passées en revue concernaient la Chine et le Japon où cette pratique est ou était courante. Les conclusions de ces auteurs sont très voisines de celles de Shuval et al. (1986) au sujet de l'utilisation en agriculture d'eaux résiduaires et peuvent être résumées comme suit :

- L'utilisation, comme engrais, d'excreta bruts entraîne une augmentation du nombre de cas de nématodoses intestinales, tant chez le consommateur que chez le personnel d'exploitation agricole.

---

<sup>1</sup> Par « eaux résiduaires traitées », on vise ici des eaux soumises à un traitement classique — sédimentation primaire, traitement biologique (filtres percolateurs ou procédé des boues activées) et sédimentation secondaire. Les effluents des stations de traitement classiques ne contiennent qu'un petit nombre d'œufs d'helminthes ou de kystes de protozoaire mais elles sont riches en bactéries et en virus d'origine fécale (voir section 7).

**Tableau 4.3. Risques relatifs découlant pour la santé de l'utilisation d'excreta et d'eaux résiduaires non traitées en agriculture et aquaculture**

Classe d'agent pathogène	Excédent relatif d'infections ou de maladies
Nématodes intestinaux : <i>Ascaris</i> <i>Trichuris</i> <i>Ancylostoma</i> <i>Necator</i>	Elevé
Infections bactériennes : diarrhées d'origine bactérienne (par exemple choléra, typhoïde)	Moins élevé
Infections virales : diarrhées d'origine virale hépatite A	Faible
Parasitoses à trématodes et à cestodes : schistosomiase distomatose d'Extrême-Orient téniaise	Elevé à nul, selon la technique particulière d'utilisation des excreta et selon les circonstances locales

- Il est démontré que le traitement des excreta réduit la transmission des parasitoses à nématodes.
- L'utilisation d'excreta comme engrais dans les rizières peut entraîner l'augmentation du nombre de cas de schistosomiase chez les riziculteurs.
- Le bétail risque d'être infesté par *Cysticercus bovis* mais il est peu probable qu'il contracte la salmonellose.

### 4.3.3 Utilisation en aquaculture

Trois risques potentiels pour la santé sont associés à l'utilisation, en aquaculture, d'excreta et d'eaux résiduaires (Feachem et al., 1983):

- le transfert passif d'agents pathogènes excrétés par les poissons et par les macrophytes aquatiques cultivés;
- la transmission de trématodes dont le cycle biologique fait intervenir des poissons et des macrophytes aquatiques (principalement *Clonorchis sinensis* et *Fasciolopsis buski*);
- la transmission de la schistosomiase.

Blum & Feachem (1985) ont également passé en revue les études épidémiologiques consacrées à l'utilisation des excréta en aquaculture. Ils n'ont trouvé qu'une seule étude dans laquelle on s'est intéressé aux risques effectifs pour la santé qui sont liés au transfert passif d'agents pathogènes excrétés; toutefois, les résultats ne permettaient aucune conclusion du fait même de la méthodologie employée. Ils n'ont retrouvé aucune étude portant sur les risques de schistosomiase par suite d'exposition professionnelle. Pour ce qui est des parasitoses à trématodes, ils ont constaté que l'utilisation d'excreta comme engrais dans les bassins d'aquaculture contribuait notablement à la transmission de ces maladies, mais qu'il en allait de même, du fait d'une pollution fécale accidentelle, dans d'autres collections d'eaux et bassins locaux où l'emploi d'excreta comme engrais n'était pas pratiqué de façon délibérée.

#### 4.4 Critères de qualité microbiologique

Les observations épidémiologiques brièvement examinées ci-dessus montrent clairement que certaines pratiques actuelles en matière d'utilisation des excréta et des eaux résiduaires peuvent entraîner un risque effectif pour la santé de certains groupes de personnes exposées (par exemple un risque de nématodose et d'infection bactérienne). Dans certains cas (transmission de maladies virales par l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires), les observations montrent que le risque d'une augmentation de l'incidence est nul tandis que, dans d'autres cas (risque de maladies bactériennes en aquaculture), les observations disponibles ne permettent pas de trancher. La base actuelle de données épidémiologiques devra évidemment être améliorée. Toutefois, malgré les limites de ces données, elles peuvent, moyennant une évaluation réaliste des risques potentiels pour la santé, constituer un bon point de départ pour élaborer des critères de qualité microbiologique applicables aux excréta et aux eaux résiduaires traitées utilisées en agriculture et en aquaculture.

L'ingénieur qui conçoit une installation de traitement des excréta ou des eaux résiduaires doit savoir dans quelle proportion il convient d'éliminer les agents pathogènes qui y sont contenus. D'un strict point de vue épidémiologique, la réponse est que le traitement doit être suffisamment poussé pour empêcher tout accroissement de la transmission des maladies. Mais cette réponse n'est pas d'un grand secours étant donné l'incertitude considérable qui entoure les doses infectieuses minimales pour bon nombre des agents pathogènes excrétés, sans compter que l'efficacité du traitement résulte non pas de la concentration

résiduelle des agents pathogènes (ou des indicateurs correspondants) dans les eaux résiduaires traitées, mais de la proportion éliminée. Néanmoins, l'ingénieur concepteur doit disposer d'une norme exprimée sous la forme d'une concentration admissible maximale pour chacun des micro-organismes d'une liste précise et cela, pour chaque mode d'utilisation des excreta et des eaux résiduaires. Des critères de qualité microbiologique ont été rendus obligatoires dans plusieurs pays au sujet des eaux résiduaires destinées à l'irrigation, mais aucun critère n'a encore été fixé pour la qualité des excreta utilisés comme engrais ni des excreta ou des eaux résiduaires utilisées en aquaculture.

#### 4.4.1 Qualité des eaux résiduaires utilisées en agriculture

L'expérience passée montre que les critères<sup>1</sup> fixés pour la qualité des eaux résiduaires destinées à l'irrigation ont été élaborés en s'inspirant de la notion d'indicateurs fécaux mis au point aux fins de l'approvisionnement en eau. Les coliformes sont utilisés depuis longtemps à cette fin et, bien qu'il existe d'autres indicateurs, ils sont encore les plus couramment utilisés bien que tous ne soient pas exclusivement d'origine fécale. Les souches non fécales sont évidemment sans intérêt pour l'évaluation de la pollution fécale: seuls peuvent être utilisés à cette fin les «coliformes fécaux» qui sont véritablement d'origine fécale exclusive. L'expression «coliformes totaux» est employée pour désigner une population non différenciée réunissant des variétés fécales et des variétés non fécales.

Les recommandations et normes<sup>1</sup> concernant la qualité des eaux usées sont donc souvent exprimées sous formes de concentrations admissibles maximales pour les coliformes totaux et coliformes fécaux. Comme l'origine fécale des eaux résiduaires n'est pas douteuse, il en résulte qu'on peut utiliser ces indicateurs fécaux comme indicateurs de la présence d'agents pathogènes et qu'il existe une relation au moins semi-quantitative entre la concentration des agents pathogènes et celle des indicateurs. En pratique, on peut se servir de coliformes fécaux comme indicateurs relativement fiables des agents pathogènes bactériens car ils présentent en gros la même capacité de survie dans l'environnement et sont détruits ou éliminés lors du traitement à peu près à la même vitesse. Les coliformes totaux sont moins fiables car, spé-

---

<sup>1</sup> La communauté scientifique élabore, sur la base des résultats disponibles, des *critères* de qualité. Ces derniers sont employés par des organisations telles que la FAO ou l'OMS pour élaborer des *recommandations* en matière de qualité. Ces dernières peuvent à leur tour être suivies par les gouvernements pour établir des *normes* de qualité qui sont rendues obligatoires dans le pays concerné par voie législative et réglementaire.

cialement dans les climats chauds, la proportion de coliformes non fécaux est souvent très élevée. Les coliformes fécaux constituent des indicateurs moins efficaces des virus excrétés et ils sont fort peu utilisés pour les protozoaires et les helminthes, parasites pour lesquels on ne connaît aucun indicateur fiable.

Les normes ou recommandations concernant la qualité des eaux résiduaires utilisées pour l'irrigation précisent en général à la fois une norme explicite (par exemple une concentration maximale pour les coliformes) et le traitement minimal exigé (primaire, secondaire ou tertiaire), selon la catégorie de plantes irriguées (produits comestibles ou non comestibles). Les normes élaborées il y a 10 à 20 ans étaient en général très rigoureuses car elles s'appuyaient sur une évaluation des risques potentiels pour la santé associés à la survie d'agents patho-

**Tableau 4.4 Exemples de normes microbiologiques actuelles imposées aux eaux résiduaires utilisées pour l'irrigation**

Pays	Irrigation avec limitation	Irrigation sans limitation
Arabie Saoudite	Utilisation d'effluents secondaires autorisée pour les cultures fourragères, les cultures de plein champ et les légumes soumis à un traitement ultérieur, ainsi que pour l'irrigation des espaces verts	<2,2 CT/100 ml <sup>a</sup> <50 CF/100 ml <sup>b</sup>
Koweït	< 10 000 CT/100 ml	< 100 CT/100 ml exclu pour les salades ou les fraises
Mexique	Pour les aires récréatives : < 10 000 CT/100 ml < 2 000 CF/100 ml	Pour les légumes consommés crus et les fruits risquant d'entrer en contact avec le sol : < 1 000 CT/100 ml
Oman	Au maximum 23 CT/100 ml En moyenne 2,2 CT/100 ml Uniquement pour l'irrigation des zones vertes de ceinture	Interdite pour l'irrigation des cultures
Pérou	Traitement précisé en fonction des modalités de réutilisation	Irrigation interdite pour les cultures de végétation basse et les légumes-racines susceptibles d'être mangés crus
Tunisie	Vergers, cultures fourragères et légumes consommés cuits : — traitement secondaire (y compris chloration) — absence de vibrions cholériques et salmonelles	Irrigation interdite pour les légumes consommés crus

<sup>a</sup> CT : coliformes totaux

<sup>b</sup> CF : coliformes fécaux

Reproduit avec l'autorisation de Strauss (1987).

gènes dans les eaux résiduaires, dans le sol et sur les plantes, ainsi que sur des considérations de faisabilité technique. La technique de choix pour l'élimination des agents pathogènes était à l'époque (le critère consistant dans l'élimination des coliformes) la chloration des effluents et, comme on pouvait ainsi obtenir facilement une très faible concentration résiduelle des coliformes, la concentration maximale admissible pour ces germes, était fixée à un niveau d'autant plus bas. Par exemple, les normes de 1968 adoptées par l'Etat de Californie autorisent seulement 23 ou 2,3 coliformes totaux par 100 ml, selon la nature de la culture irriguée (California State Department of Public Health, 1968); en 1973, il a été noté lors d'une réunion d'experts de l'OMS qu'il était «techniquement possible de produire, à partir d'eaux usées, un effluent ne contenant pas plus de 100 coliformes/100 ml» et que l'irrigation de cultures au moyen d'un seul effluent et sans aucune res-

**Tableau 4.5 Recommandations provisoires en matière de qualité microbiologique des eaux résiduaires traitées réutilisées pour l'irrigation**

*Remarque :* Dans chaque cas d'espèce, il convient d'adapter les valeurs recommandées à la situation locale sur le plan épidémiologique, socioculturel et hydrogéologique.

Technique de réutilisation	Nématodes intestinaux <sup>a</sup> (moyenne arithmétique du nombre d'œufs viables par litre)	Coliformes fécaux (moyenne géométrique du nombre de coliformes par 100 ml)
Irrigation avec limitation <sup>b</sup> irrigation des arbres, des cultures de plantes industrielles, des cultures fourragères, des arbres fruitiers <sup>c</sup> et des pâturages <sup>d</sup>	≤ 1	sans objet
Irrigation sans limitation Irrigation des cultures de plantes comestibles, des terrains de sport et des parcs publics <sup>e</sup>	≤ 1	≤ 1 000 <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Ascaris, trichocéphales et ankylostomes

<sup>b</sup> Dans tous les cas, le traitement minimal exigé équivaut à au moins un séjour de 1 jour en bassin anérobie puis de 5 jours en bassin facultatif, ou à un traitement équivalent.

<sup>c</sup> L'irrigation doit être interrompue deux semaines avant la récolte des fruits, et aucun fruit ne doit être ramassé sur le sol.

<sup>d</sup> L'irrigation doit être interrompue deux semaines avant la date fixée pour le début du pacage.

<sup>e</sup> Des facteurs épidémiologiques locaux peuvent exiger l'adoption d'une norme plus rigoureuse pour les pelouses publiques, spécialement les pelouses d'hôtel dans les régions touristiques.

<sup>f</sup> Cette recommandation peut être assouplie quand les plantes comestibles sont systématiquement consommées après une longue cuisson.

Source : Centre international de référence pour l'évacuation des déchets (1985).

triction ne comportait sans doute que « peu de risques pour la santé » (Organisation mondiale de la Santé, 1973). Cependant, comme le montre le tableau 4.4, la plus grande diversité règne dans les normes adoptées au sujet de l'utilisation des eaux résiduaires.

L'étude attentive d'observations épidémiologiques dignes de foi — autrement dit, d'études comportant une évaluation des risques effectifs, et non potentiels, pour la santé (section 4.3) — montre que ces normes sont peut-être inutilement restrictives. De plus, la conception des bassins de stabilisation, qui représente en général le système de choix pour le traitement des eaux résiduaires dans les pays en développement (voir section 7.2), a fait des progrès considérables au cours des 10-20 dernières années, de sorte qu'on peut aujourd'hui facilement ramener avec une très grande fiabilité la proportion des agents pathogènes résiduels à la valeur souhaitée. Compte tenu de ce qui précède, des experts réunis sous le patronage de la Banque mondiale, de l'Organisation mondiale de la Santé et du Centre international de référence pour l'évaluation des déchets (IRCWD) à Engelberg (Suisse), en juillet 1985, ont recommandé l'adoption des valeurs indiquées au tableau 4.5. On trouvera dans l'encadré 4.2 un exposé détaillé des raisons qui ont présidé à l'adoption des valeurs recommandées à Engelberg en matière de qualité, sous le nom de « déclaration d'Adelboden ».

Les normes de qualité adoptées à Engelberg pour l'irrigation sans limitation (arbres, cultures industrielles et fourragères, arbres fruitiers et pâturages) ont introduit pour la première fois une norme explicite applicable aux helminthes (moins de 1 œuf viable de nématodes intestinaux par litre), qui suppose une élimination très complète des œufs (>99%). Le but de cette norme est de protéger la santé des ouvriers agricoles qui sont très exposés aux nématodoses intestinales. Des eaux résiduaires conformes à cette norme ne contiennent au maximum qu'un petit nombre de kystes de protozoaires de sorte que le personnel employé dans les champs et les consommateurs seront du même coup protégés contre les protozooses. De même, les eaux résiduaires ne contiennent aucun œuf de ténia (ou, exceptionnellement, n'en contiennent que quelques-uns), de sorte que le bétail à l'embouche est protégé contre *Cysticercus bovis*, et que les consommateurs sont eux-mêmes à l'abri des ténias du bœuf. Plusieurs techniques de traitement permettent d'obtenir cette qualité mais la plus appropriée, dans de nombreux cas, consiste dans un réseau de bassins de stabilisation comportant un bassin anaérobie avec séjour de 1-2 jours suivi d'un bassin facultatif, puis d'un bassin de maturation ayant chacun une durée de rétention d'au moins 5 jours (Mara & Silva, 1986).

Les valeurs recommandées à Engelberg pour la qualité des eaux résiduaires utilisées dans l'irrigation sans limitation (cultures des plantes

## **Encadré 4.2 Justification des recommandations formulées à Engelberg à propos de la qualité microbiologique des eaux résiduaires traitées utilisées pour l'irrigation: déclaration d'Adelboden**

Les normes de qualité microbiennes très rigoureuses élaborées par le Ministère de la santé de l'Etat de Californie et d'autres groupes il y a une cinquantaine d'années, à savoir la présence de 2 coliformes pour 100 ml d'effluent, en vue de l'irrigation des cultures de légumes et de salades consommés crus, étaient fondées sur la notion de «risque nul». Elles s'inspiraient en partie de publications qui faisaient état de la mise en évidence et de la survie d'agents pathogènes dans les eaux résiduaires et dans le sol, ce qui donnait à penser que la simple présence d'agents pathogènes dans le milieu ambiant était la preuve d'un grave danger pour la santé publique. Un autre élément qui a peut-être poussé à l'adoption de ces normes était l'opposition du grand public aux exploitations agricoles irriguées avec des eaux résiduaires brutes qu'on avait autrefois implantées à proximité de zones résidentielles et gérées sans rigueur, d'où la crainte d'odeurs déplaisantes et de nuisances à cause des mouches. Ces normes étaient difficiles à respecter avec les techniques normales de traitement des eaux résiduaires, même dans les pays développés, mais cette considération n'a guère freiné les autorités sanitaires qui préféraient sans doute que l'irrigation non réglementée ne devienne pas une pratique générale. Il faut également dire que ces premières normes rigoureuses n'étaient pas fondées sur l'analyse d'études épidémiologiques. Les normes adoptées en Californie en matière de réutilisation des eaux résiduaires ont rapidement été reprises par la plupart des pays en développement, faute d'autres sources crédibles d'observations sur la question. Pourtant, depuis quelque temps les experts mettent en doute la validité de cette position, la jugeant inutilement rigoureuse; par exemple, un groupe de travail de l'OMS a déclaré que, même si c'était techniquement possible, des considérations pratiques et économiques empêchaient qu'on puisse parvenir à un niveau «sans risque» (OMS, 1981<sup>9</sup>).

Les participants à la réunion d'Engelberg ont procédé à une évaluation critique de la masse d'observations économiques ayant servi de base à l'étude de la Banque mondiale (Shuval et al., 1986) ainsi qu'à l'étude IRCWD/OMS (Blum & Feachem, 1985) sur les effets sanitaires crédibles découlant de l'utilisation en agriculture d'excreta et d'eaux résiduaires. Leur conclusion a été unanime: les risques liés à l'utilisation pour l'irrigation d'eaux résiduaires correctement traitées sont minimes et la rigueur des normes en vigueur pour la qualité bactérienne injustifiée. Cependant, ces experts ont reconnu que, dans de nombreux pays en développement, les principaux risques proviennent des helminthiases, de sorte que l'utilisation d'eaux résiduaires nécessite, pour être sans danger, une élimination poussée des helminthes. Ainsi, les recommandations d'Engelberg traduisent une façon plus rigoureuse de concevoir la nécessité d'abaisser la quantité d'œufs d'helminthe contenus dans les effluents à un œuf au maximum par litre. Cela suppose des procédés de traitement qui permettent une élimination très efficace des helminthes, dans une proportion de l'ordre de 99,9%.

*(Encadré 4.2 suite)*

Les bassins de stabilisation sont particulièrement efficaces à cette fin, mais d'autres techniques sont possibles. Si les recommandations d'Engelberg ne visent expressément aucun protozoaire d'importance médicale, tels que les amibes et les giardias, il est sous-entendu que la norme rigoureuse recommandée pour les helminthes est représentative de tous les agents pathogènes de grande dimension qui décantent facilement, y compris les protozoaires. Les recommandations d'Engelberg impliquent donc une élimination de tous les protozoaires.

D'un autre côté, les participants à la réunion d'Engelberg sont tombés d'accord pour estimer qu'une norme de qualité microbienne fixée à environ 1 000 coliformes fécaux pour 100 ml dans le cas de l'irrigation sans limitation était à la fois épidémiologiquement fondée et techniquement possible. Ils ont en outre estimé que cette valeur était parfaitement conforme à la qualité réelle des eaux de rivière utilisées en Europe et aux Etats-Unis d'Amérique pour ce type d'irrigation, apparemment sans aucun effet néfaste sur la santé. Le groupe a noté également qu'une concentration de 1 000 coliformes pour 100 ml est jugée convenable dans de nombreux pays pour les eaux de baignade. Il n'a pas paru rationnel d'imposer une norme plus rigoureuse pour l'irrigation sans limitation que celle jugée acceptable dans la plupart des pays industrialisés pour l'irrigation en général et pour la baignade.

En outre, les participants à la réunion d'Engelberg se sont déclarés convaincus que l'application irrationnelle de normes inutilement rigoureuses en matière de qualité microbiologique des eaux résiduaires pour l'irrigation avait conduit à une situation anormale. Souvent, ces normes ne sont pas du tout appliquées de sorte que de graves problèmes de santé publique résultent de l'utilisation, en pleine illégalité, d'eaux résiduaires brutes, pour l'irrigation des salades — pratique d'ailleurs très courante dans de nombreux pays en développement. La démarche adoptée à Engelberg vise à imposer de nouvelles normes, réalistes, à la fois plus rigoureuses pour ce qui est de l'élimination des helminthes et plus conformes aux possibilités de la technique en ce qui concerne les bactéries. Selon les épidémiologistes aussi bien que les ingénieurs du groupe d'Engelberg, cette nouvelle approche permettrait de mieux protéger la santé d'un plus grand nombre de personnes en imposant des objectifs compatibles avec les impératifs de l'économie et de la technique.

Le lecteur désireux de disposer d'une analyse complète des bases épidémiologiques sur lesquelles reposent les recommandations d'Engelberg pourra se reporter aux études originales de Shuval et al. (1986) et de Blum & Feachem (1985). Les présentes recommandations sont destinées à guider les ingénieurs concepteurs dans le choix de techniques de traitement et de gestion qui garantissent le respect des nouvelles normes. Dès lors qu'elles seront respectées, il deviendra inutile de surveiller en permanence la concentration des micro-organismes indicateurs.

**Tableau 4.6** Nombre moyen (géométrique) de bactéries et de virus<sup>a</sup>, et taux d'élimination de ces germes (en pourcentage) dans des eaux résiduaires brutes (ERB) et dans les effluents de cinq bassins de stabilisation en série (P1-P5)<sup>b</sup> dans le nord-est du Brésil à une température moyenne de 26 °C (à mi-profondeur)

Micro-organisme	ERB	P1	P2	P3	P4	P5	Taux d'élimination (%)
Coliformes fécaux	$2 \times 10^7$	$4 \times 10^6$	$8 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$3 \times 10^4$	$7 \times 10^3$	99,97
Streptocoques fécaux	$3 \times 10^6$	$9 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^4$	$2 \times 10^3$	300	99,99
<i>Clostridium perfringens</i>	$5 \times 10^4$	$2 \times 10^4$	$6 \times 10^3$	$2 \times 10^3$	$1 \times 10^3$	300	99,40
<i>Bifidobacterium</i> totaux	$1 \times 10^7$	$3 \times 10^6$	$5 \times 10^4$	100	0	0	100,00
<i>Bifidobacterium</i> (sorbitol +)	$2 \times 10^6$	$5 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	40	0	0	100,00
<i>Campylobacter</i>	70	20	0,2	0	0	0	100,00
Salmonelles	20	8	0,1	0,02	0,01	0	100,00
Entérovirus	$1 \times 10^4$	$6 \times 10^3$	$1 \times 10^3$	400	50	9	99,91
Rotavirus	800	200	70	30	10	3	99,63

<sup>a</sup> Nombre de bactéries pour 100 ml, nombre de virus pour 10 litres.

<sup>b</sup> Le bassin P1 est un bassin anaérobie comportant une durée moyenne de rétention hydraulique de 1 jour ; les bassins P2 et P3-P5 correspondent respectivement à un bassin facultatif secondaire et à des bassins de maturation, ayant chacun une durée de rétention de 5 jours. La profondeur du bassin est comprise entre 2,8 et 3,4 m.

Source : Oragui et al. (1987).

comestibles — y compris celles qui sont consommées crues et pour l'arrosage des terrains de sport et parcs publics, comportent la même valeur limite pour les helminthes et une concentration maximale (moyenne géométrique) de 1 000 coliformes fécaux pour 100 ml. Cette dernière recommandation vise à protéger la santé des consommateurs, spécialement des consommateurs de légumes et de salades. Cette concentration représente un assouplissement important par rapport aux normes antérieures mais elle est conforme aux normes actuelles imposées pour la qualité de l'eau de baignade; en Europe, par exemple, cette norme est fixée à moins de 2 000 coliformes fécaux pour 100 ml (Conseil des communautés européennes, 1976) et il serait irrationnel de réclamer une norme plus rigoureuse pour l'irrigation que pour l'immersion totale du corps. Des travaux récents (Oragui et al., 1987) confirment qu'une concentration inférieure à 1 000 coliformes fécaux par 100 ml, ce qui implique une élimination des coliformes fécaux dans une proportion très élevée ( $4-6 \log_{10}$  ou  $> 99,99\%$ ), correspond à la quasi-absence de bactéries pathogènes (voir tableau 4.6). Il est facile d'obtenir des effluents de cette qualité en utilisant en série 4-6 bassins de stabilisation avec une durée totale de rétention d'au moins 20 jours, à une température supérieure à 20 °C (voir section 7.2). Des effluents de qualité plus élevée (par exemple moins de 100 coliformes fécaux par 100 ml) peuvent être exigés quand les eaux résiduaires servent à l'irrigation de parcs publics et de pelouses d'hôtel, afin de protéger la santé des personnes qui entrent en contact avec une pelouse récemment irriguée, spécialement les touristes et les jeunes enfants.

#### 4.4.2 Qualité des excreta destinés à l'agriculture

Lorsqu'on répand dans les champs, avant la plantation, des excreta ou des produits dérivés (par exemple des boues résultant du traitement des eaux résiduaires, du compost ou des boues de latrine ou de fosses septiques), aucun critère de qualité n'est recommandé, à condition que:

- les déchets soient déposés dans une tranchée et recouverts d'une couche de terre d'au moins 25 cm;
- le personnel de l'exploitation agricole ou des stations d'assainissement soit convenablement protégé pendant l'opération;
- aucune plante-racine ne soit plantée directement à l'aplomb des tranchées.

Quand les déchets ne sont pas enterrés dans des tranchées mais sont répandus sur le sol pour l'amendement de la couche superficielle (utilisation courante des composts, par exemple) ou encore régulièrement dispersés sur le sol après la plantation (utilisation générale des gadoues liquides), il convient d'observer les recommandations d'Engelberg pour l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires (en choisissant la limite de moins de 1 œuf par litre ou kilogramme (de substance humide) et de moins de 1 000 coliformes fécaux pour 100 ml ou 100 g (de substance humide) selon le cas). Pour faire respecter la norme relative aux helminthes dans le cas de l'irrigation avec limitation, il existe diverses techniques, le compostage étant un moyen efficace d'atteindre la norme de moins de 1 000 coliformes fécaux pour 100 g fixée pour l'irrigation sans limitation (voir section 7.2.3).

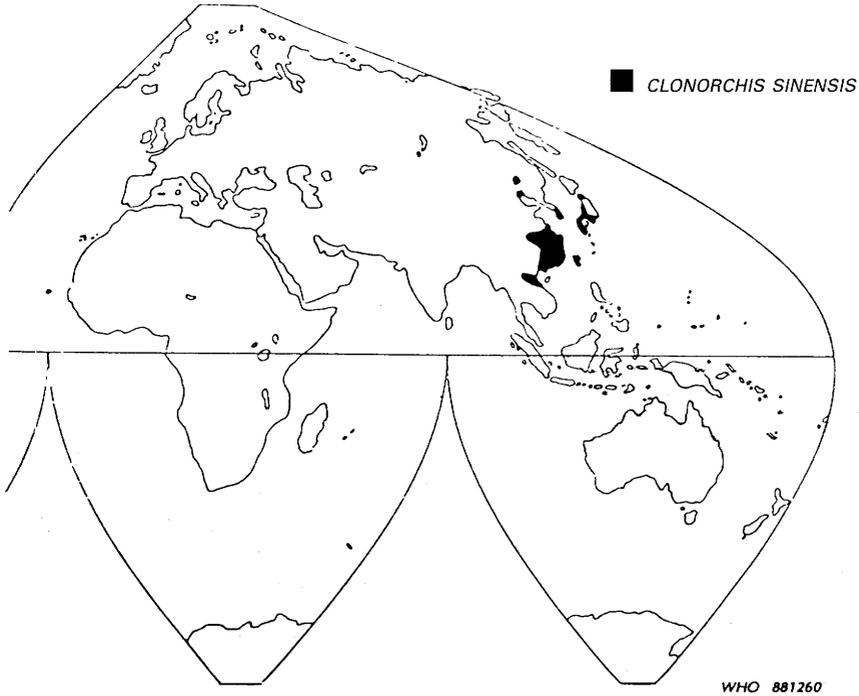
#### **4.4.3 Qualité des excreta et des eaux résiduaires destinées à l'agriculture**

Strauss (1985) a publié une mise au point sur la survie des agents pathogènes à l'intérieur et à la surface des poissons. Ces principales conclusions sont reproduites ci-dessous :

- L'invasion des muscles pisciaires par des bactéries pathogènes constitue une éventualité très probable lorsque les poissons sont élevés dans des bassins où la concentration des coliformes fécaux et des salmonelles est respectivement supérieure à  $10^4$  et  $10^5$  pour 1 000 ml ; le risque d'invasion musculaire augmente avec le degré d'exposition à l'eau contaminée.
- Même en présence d'une contamination moins importante, la concentration des agents pathogènes risque d'être élevée dans les voies digestives et dans le liquide intrapéritonéal des poissons.

Des travaux complémentaires sont indispensables avant qu'on puisse fixer une norme définitive de qualité bactériologique en pisciculture, mais à titre provisoire, on pourrait recommander de fixer la concentration des coliformes fécaux à moins de 1 000 pour 100 ml dans l'eau des bassins. Une norme identique devrait être appliquée aux bassins utilisés pour la culture de macrophytes, car ces derniers sont fréquemment consommés crus. Une autre mesure indispensable en matière de santé publique est d'assurer une hygiène rigoureuse lors de la manipulation des poissons, spécialement lors de leur éviscération. C'est plus facile à obtenir dans les établissements commerciaux que dans le cas

Fig. 4.7 Distribution géographique de *Clonorchis sinensis*



D'après Feachem et al. (1983), reproduit avec l'autorisation de la Banque mondiale.

de l'aquaculture de subsistance pour laquelle il faudra souvent conduire des programmes durables d'éducation pour la santé.

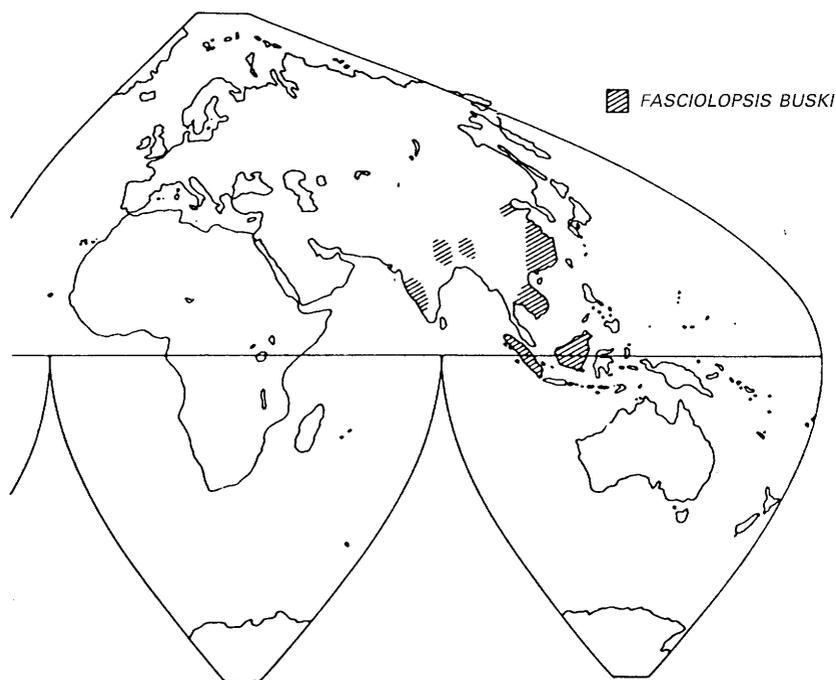
Les distomatoses d'Extrême-Orient ou du Sud-Est asiatique se cantonnent, comme leur nom l'indique, dans des régions géographiques très limitées d'Asie (voir figures 4.7 et 4.8).

Etant donné que, dans certaines régions, il est traditionnel de manger crus le poisson et les plantes aquatiques comestibles — alors qu'il s'agit des deuxièmes hôtes intermédiaires des agents pathogènes responsables des distomatoses ci-dessus — les seules méthodes pour empêcher la transmission consistent à faire en sorte qu'aucun œuf ne parvienne dans les bassins ou à détruire les gastéropodes. La seconde solution n'a pas grande chance d'être appliquée durablement en pratique, spécialement dans les petits bassins de subsistance qui sont courants dans certaines régions d'Asie. Dans ces conditions, la seule méthode de lutte praticable consiste à éliminer tous les œufs viables de trématodes avant que les excréta ou les eaux résiduelles ne soient déversés dans les bassins; il faut insister sur le fait que *tous* les œufs doivent

être tués du fait de la prolifération considérable (reproduction asexuée) de l'agent pathogène chez son premier hôte intermédiaire. Les mêmes considérations valent pour la schistosomiase (bilharziose qui constitue un risque professionnel potentiel pour le personnel des bassins de pisciculture et des bassins de culture de macrophytes dans une zone géographique beaucoup plus vaste (voir figures 4.9 et 4.10). Le critère de qualité recommandé pour les helminthes chaque fois qu'on utilise en aquaculture des excréta et des eaux résiduaires consiste donc dans l'absence d'œufs viables de trématodes. Cette condition est facile à obtenir par le traitement des eaux résiduaires dans une série de bassins et par un stockage d'au moins un mois dans le cas des excréta (voir section 7.2.4).

Les valeurs provisoires recommandées pour la qualité microbologique en aquaculture, analogues aux valeurs recommandées pour l'utilisation en agriculture, sont indiquées au tableau 4.7.

**Fig. 4.8** Distribution géographique de *Fasciolopsis buski*



D'après Feachem et al. (1985), reproduit avec l'autorisation de la Banque mondiale.

Fig. 4.9 Distribution géographique de *Schistosoma haematobium*, *S. japonicum* et *S. mekongi*

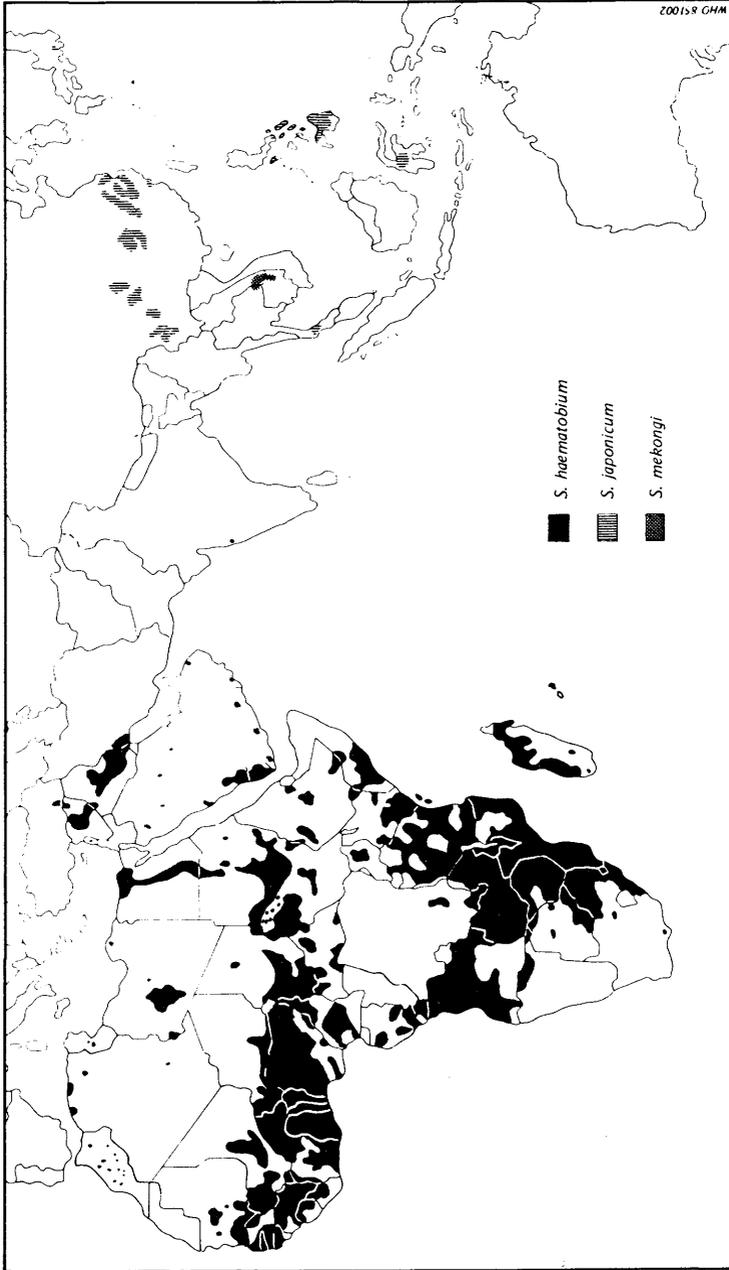
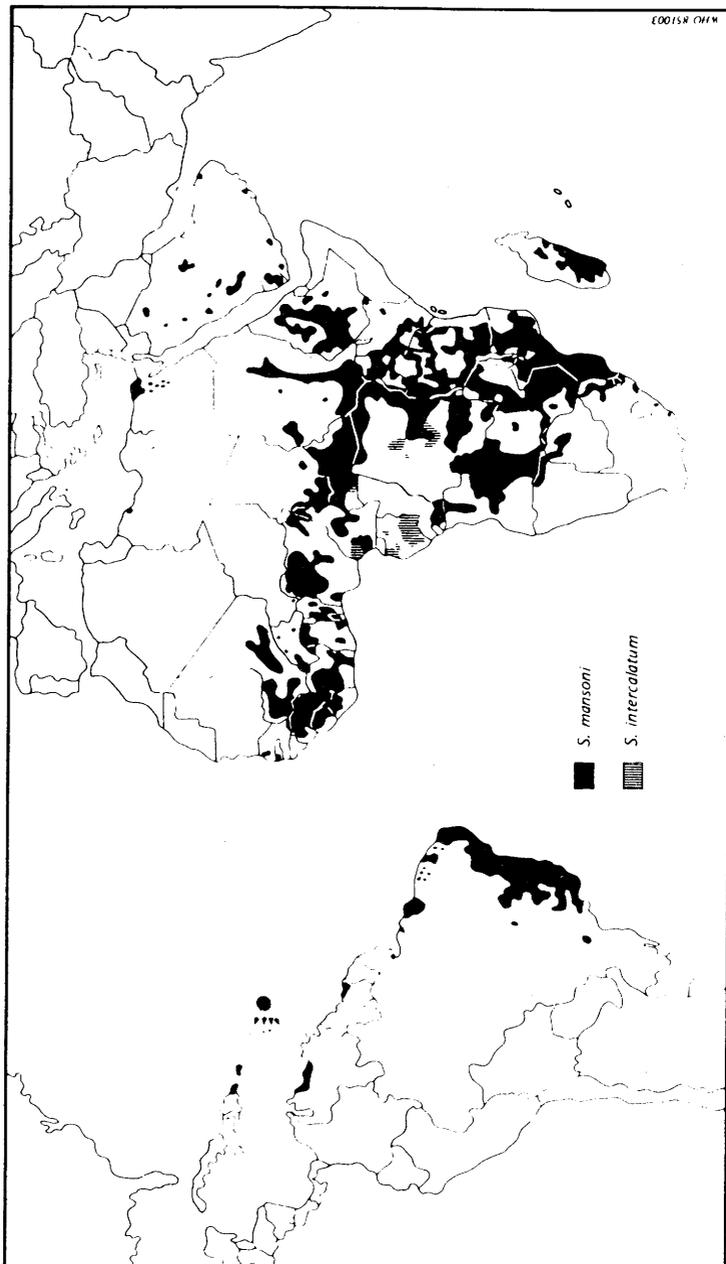


Fig. 4.10 Distribution géographique de *Schistosoma mansoni* et de *S. intercalatum*



**Tableau 4.7 Critères provisoires de qualité microbiologique pour les eaux résiduaires et les excreta utilisés en aquaculture**

Mode de réutilisation	Œufs de trématodes viables <sup>a</sup> (nombre moyen arithmétique par litre ou kg)	Coliformes fécaux (nombre moyen géométrique pour 100 ml ou pour 100 g) <sup>b</sup>
Pisciculture	0	< 10 <sup>4</sup>
Culture de macrophytes aquatiques	0	< 10 <sup>4</sup>

<sup>a</sup> Douves (*Clonorchis*, *Fasciolopsis*) et schistosomes. La valeur recommandée ne concerne que les régions d'endémie (Fig. 4.7-4.10).

<sup>b</sup> Cette recommandation suppose que la réduction du nombre de coliformes fécaux dans le bassin soit de 1 log<sub>10</sub>, de façon que la concentration des coliformes dans le bassin soit abaissée à moins de 1 000 pour 100 ml. Si la température de l'eau du bassin et la durée de rétention permettent une réduction plus importante, on peut se fixer une valeur moins exigeante.

# 5

## Aspects socioculturels

Les comportements humains jouent un rôle essentiel dans la transmission des maladies associées aux excréta. La possibilité d'imposer à une société la modification de certains de ses comportements en vue d'introduire un système d'utilisation des excréta ou des eaux résiduaires ou de réduire la transmission des maladies dans les systèmes en place ne peut être appréciée que si l'on connaît au préalable la valeur culturelle attachée à des pratiques qui semblent avoir la préférence de la société alors qu'elles facilitent la transmission des maladies. Les croyances sont si différentes selon les régions du monde qu'il est impossible d'admettre que l'une quelconque des pratiques qui ont vu le jour en matière d'utilisation des excréta et des eaux usées (voir tableau 2.1., page 28) soit immédiatement transposable ailleurs: il est toujours indispensable de procéder à une évaluation approfondie du contexte socio-culturel local (Cross, 1985).

### 5.1 Utilisation des excréta

Les sociétés humaines manifestent vis-à-vis de l'utilisation d'excreta non traités des réactions fort diverses allant, selon le contexte socio-culturel, de la répulsion à la prédilection, en passant par une attitude réservée ou, au mieux, indifférente. Cela tient à une idée fortement enracinée selon laquelle les excréta, spécialement les matières fécales, sont des substances répugnantes dont il faut préserver la vue et l'odorat. Les produits fertilisés avec des excréta bruts sont considérés comme avariés ou souillés dans un certain sens. Le même point de vue ne prévaut pas, ou du moins de façon moins rigoureuse, s'agissant de composts préparés à l'aide d'excreta ou de boues provenant du traitement d'eaux résiduaires, éléments d'ailleurs couramment utilisés en agriculture, en aquaculture et dans les projets de mise en valeur des terres.

A l'opposé, dans des pays comme la Chine, le Japon et Java, on utilise les déchets, tant humains qu'animaux, en agriculture et en aquaculture depuis des milliers d'années (voir section 2.3). Cette pratique est admise par la société japonaise ou chinoise, marquée par une tradition de frugalité, et elle reflète une compréhension profonde, du point de vue écologique comme du point de vue économique, du rapport

de dépendance qui existe entre la fertilité du sol et les déchets d'origine humaine. Dans ces sociétés, la culture intensive est apparue sous la pression d'une situation où il fallait nourrir un grand nombre de personnes habitant une région où les terres arables étaient limitées, de sorte qu'il fallait tirer le meilleur parti possible de toutes les ressources disponibles, y compris les excréta. L'utilisation des excréta constitue ainsi un impératif des économies de survie. Même en pareil cas, il est vraisemblable que toute mesure visant à essayer de réduire au minimum les risques pour la santé en modifiant les pratiques usuelles en matière d'utilisation des excréta n'a de chances d'être acceptée par la société et de s'imposer que si les modifications apportées sont minimales et socialement négligeables. Toute tentative visant à modifier une préférence sociale est en principe vouée à l'échec. Cela étant, il est probable que l'entreposage des excréta afin d'inactiver les œufs de trématodes constitue une modification envisageable malgré l'idée selon laquelle les excréta doivent être utilisés à l'état frais (c'est-à-dire sans traitement) pour avoir le maximum d'efficacité en agriculture, alors que des exhortations à ne pas consommer de poisson cru reviendraient certainement à prêcher dans le désert.

En terre d'Islam, les contacts directs avec les excréta constituent un sujet d'aversion car, d'après le Coran, les excréta contiennent des impuretés (*nadjassa*). Leur utilisation est autorisée uniquement si les *nadjassas* ont été éliminées. C'est dire que l'utilisation en agriculture d'excréta non traités ne serait pas tolérée et que toutes les tentatives visant à modifier ce point de vue seraient dénuées de sens. En revanche, l'utilisation d'excréta après traitement serait acceptable si ce dernier assurait l'élimination des *nadjassas* — par exemple après compostage thermophile, procédé qui fournit une substance analogue à l'humus, ne rappelant en rien, ni par la vue ni par l'odeur, le produit original. On peut considérer que les *nadjassas* sont éliminées par d'autres méthodes. A Java, par exemple, on accepte l'utilisation d'excréta non traités comme engrais dans les bassins de pisciculture parce que les excréta sont dilués dans l'eau et que l'eau s'écoule d'un bassin au suivant; cette association d'une dilution et d'un écoulement est considérée comme rendant l'eau pure (*tahour*), de sorte que la pratique n'est pas rejetée sur le plan religieux.

Dans de nombreux pays en développement, le ramassage des gadoues urbaines est un travail très peu considéré, de sorte qu'il devient de plus en plus difficile pour les autorités urbaines de recruter le personnel nécessaire. Il en résulte que les installations sanitaires qui conduisent à la production de gadoues, par exemple les latrines à tinette, sont peu à peu remplacées par d'autres types d'installation, par exemple des latrines à chasse. En fait, dans certains pays, par exemple en Inde,

les pouvoirs publics appuient des programmes visant à remplacer les latrines à tinette par des latrines à chasse, non seulement dans le souci d'améliorer la santé de la population mais aussi afin de répondre «à la demande d'une société qui exige qu'il soit mis fin à cette pratique dégradante qui impose à des hommes de transporter des gadoues» (Venugopalan, 1984). Les gadoues sont donc peu à peu remplacées par des boues de latrine comme produit brut dans les systèmes d'utilisation des excreta. Du point de vue de la lutte contre les maladies associées aux excreta, on ne peut que se féliciter de cette évolution car la charge d'agents pathogènes est notablement réduite, de même, par conséquent, que le risque potentiel pour la santé.

## 5.2 Utilisation des eaux résiduaires

De nos jours on utilise des eaux résiduaires non traitées pour l'irrigation dans de nombreuses régions du monde, sans apparemment que cette pratique ne provoque de rejet véritable sur le plan socio-culturel. (Tel n'est cependant pas toujours le cas, cette pratique étant parfois adoptée sous la seule pression d'impératifs économiques.) Les eaux résiduaires traitées soulèvent beaucoup moins d'objections que les eaux non traitées du fait de leur aspect et, sur le plan socio-esthétique, elles sont mieux adaptées à une utilisation en agriculture et en aquaculture. Le cas échéant, on peut apaiser les craintes du grand public grâce à des programmes d'information bien conçus.

Dans les pays musulmans, les eaux résiduaires peuvent être utilisées pour l'irrigation à condition que les impuretés (*nadjassas*) en soient éliminées. En fait, on se sert d'eaux résiduaires non traitées dans certains de ces pays, principalement dans les régions où l'eau est extrêmement rare et provient en général d'un oued local (cours d'eau temporaire en zone désertique); mais cette pratique répond manifestement à une nécessité économique sans constituer une préférence culturelle. D'après Farooq & Ansari (1983) il existe trois possibilités pour transformer une eau impure en eau pure:

- auto-épuration de l'eau (par exemple élimination des impuretés par sédimentation);
- addition d'eau pure en quantité suffisante pour diluer les impuretés;

- élimination des impuretés avec le temps ou par suite de mécanismes physiques (par exemple le soleil ou le vent).

Il est clair que la première et la troisième de ces transformations sont, pour l'essentiel, analogues à celles qu'on obtient dans les installations modernes de traitement des eaux résiduaires, spécialement par le procédé des bassins de stabilisation.

# 6

## Aspects écologiques

Moyennant une bonne planification et une bonne gestion, les systèmes d'utilisation des excréta et des eaux résiduaires peuvent avoir une incidence bénéfique sur l'environnement tout en augmentant les rendements en agriculture et en aquaculture. L'amélioration de l'environnement constitue la résultante de plusieurs facteurs, dont les plus importants sont énumérés ci-dessous :

- Suppression ou réduction de la pollution des eaux de surface, contrairement à ce qui arriverait si l'on n'utilisait pas les eaux résiduaires mais qu'on les rejette dans les cours d'eau ou les lacs. Les grands problèmes de pollution de l'environnement tels que l'appauvrissement en oxygène dissous, l'eutrophisation, la formation de mousse et la destruction des poissons, peuvent ainsi être évités.
- Préservation ou utilisation plus rationnelle des ressources en eau douce, spécialement dans les régions arides et semi-arides : les eaux non polluées couvrant les besoins des villes et les eaux résiduaires les besoins de l'agriculture.
- Réduction des besoins en engrais artificiels d'où, parallèlement, réduction des dépenses d'énergie et de la pollution industrielle en d'autres lieux.
- Préservation du sol grâce à la constitution d'une couche d'humus qui s'oppose à l'érosion.
- Lutte contre la désertification et remise en valeur des déserts grâce à l'irrigation et à la fertilisation de rideaux d'arbres.
- Amélioration des zones d'agrément en ville, grâce à l'irrigation et à la fertilisation d'espaces verts destinés à des activités récréatives (parcs, terrains de sport) ou au plaisir des yeux (fleurs, buissons et arbres à proximité des routes et autoroutes urbaines).

La pollution du sol et des eaux souterraines constitue évidemment un inconvénient potentiel de l'utilisation des excréta et des eaux résiduaires en agriculture. Dans la plupart des conditions, l'irrigation au

moyen d'eaux résiduaires ne constitue pas une menace microbiologique pour les eaux souterraines car il s'agit d'un processus analogue à la filtration lente sur sable: la plupart des agents pathogènes sont arrêtés dans la couche supérieure, sur quelques mètres de profondeur, tandis que la distance de transport horizontal est en principe inférieure à 20 m quand les caractéristiques pédologiques sont uniformes. Cependant, dans certaines situations hydro-géologiques (par exemple dans des formations calcaires), les polluants microbiens peuvent être transportés beaucoup plus loin, de sorte qu'une investigation approfondie s'impose en pareil cas (voir Lewis et al., 1982). Des polluants chimiques, dont les plus préoccupants sont les nitrates dans le cas des déchets domestiques, peuvent être transportés sur une plus longue distance et il existe un risque potentiel de pollution des réserves d'eau potable proches des zones où l'irrigation est pratiquée au moyen d'eaux résiduaires. De façon générale, il faut qu'aucune réserve d'eau ne soit située à l'intérieur ou à proximité des champs irrigués de cette façon.

L'irrigation au moyen d'eaux résiduaires peut entraîner la pollution du sol par suite d'une saturation plus rapide en eau et en sel si l'on ne prête pas l'attention qui convient aux besoins en matière de drainage et de lessivage. Les eaux de drainage à caractère salin doivent, si possible, être réservées à l'irrigation de cultures tolérantes au sel et, en général, la rotation des cultures et l'assolement sont nécessaires pour éviter que la structure pédologique ne se dégrade à long terme. Le respect de bonnes pratiques en matière d'irrigation est essentiel pour éviter les effets nocifs sur l'environnement; on trouvera des précisions sur la question dans les manuels classiques (par exemple, Rydzewski, 1987; Pettygrove & Asano, 1984; Ayers & Westcot, 1985). Souvent, il faut mettre en balance la production agricole et la protection de l'environnement, ce qui exige une évaluation rigoureuse au stade de la planification des projets (voir section 8). Bon nombre des inconvénients potentiels évoqués ci-dessus au sujet de l'irrigation par eaux résiduaires peuvent être évités moyennant un traitement convenable, de même que diverses nuisances comme les mauvaises odeurs, la prolifération de vecteurs et les conséquences de rejets accidentels de substances toxiques (voir section 7).

L'utilisation d'excreta en agriculture et en aquaculture comporte un grand nombre des avantages de l'utilisation d'eaux résiduaires tout en ayant *a priori* moins d'inconvénients pour l'environnement. La plupart des systèmes d'assainissement fonctionnant sur place peuvent facilement être conçus ou adaptés en vue d'une réutilisation: les boues de latrines ainsi obtenues peuvent être utilisées sans danger. La production d'un compost à partir d'excreta et de déchets domestiques réduits en poudre de façon à corriger le rapport carbone/azote et la

teneur en eau des excreta (voir section 7.2.3) constitue la technique la plus écologique puisqu'elle permet de récupérer et d'utiliser ensuite les deux polluants qui offusquent le plus la vue dans les villes des pays en développement, à savoir les excreta et les ordures ménagères. Le compost préparé à partir d'excreta constitue un précieux conditionneur de sol et un engrais exempt d'agents pathogènes. Sa production et son utilisation apportent une solution simple et écologiquement intéressante, à la fois au problème de la réutilisation des déchets humains et à celui de la pollution dans les agglomérations urbaines sans réseau d'égouts.

# 7

## Solutions techniques pour la protection sanitaire

### 7.1 Introduction

Pour prévenir la transmission des maladies, la plus efficace et la plus fiable de toutes les méthodes consiste à traiter les déchets en respectant les critères de qualité d'Engelberg (voir section 4.4). On peut ainsi interrompre ou ramener à un niveau épidémiologiquement négligeable la transmission de maladies aux personnes qui travaillent dans les champs et les bassins d'aquaculture ou qui vivent à proximité, ainsi qu'aux consommateurs.

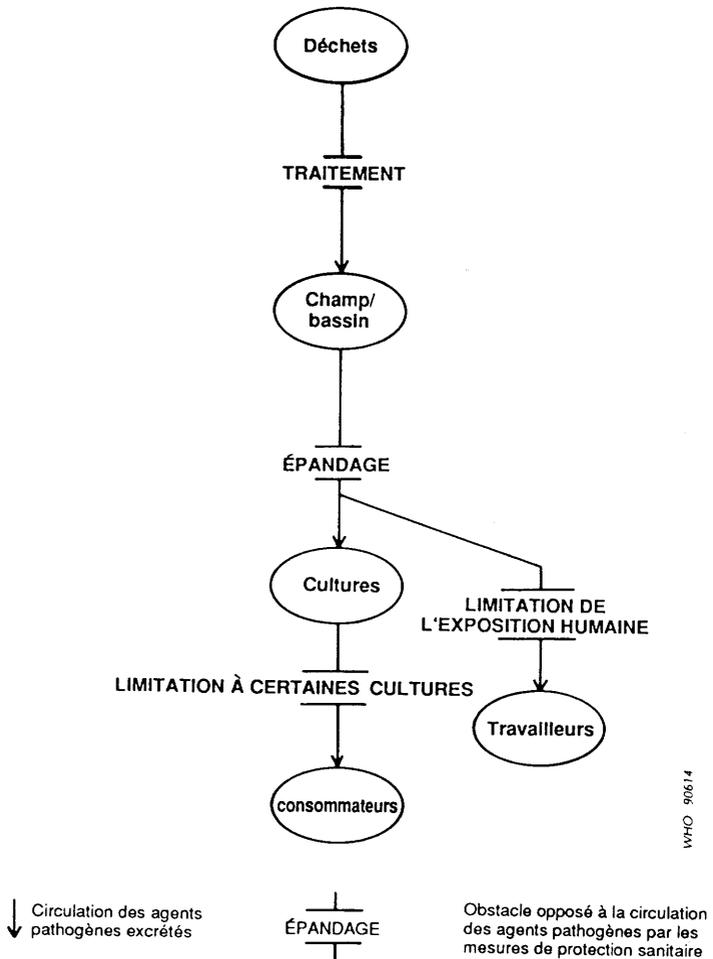
Mais un traitement aussi poussé risque d'être coûteux ou impraticable, voire inutile, vu que la présence d'agents pathogènes d'origine humaine dans les champs ou dans les bassins ne représente pas forcément un danger pour la santé si des mesures convenables sont prises par ailleurs pour assurer la protection sanitaire. Ces mesures peuvent empêcher les agents pathogènes d'atteindre le personnel d'exploitation ou les cultures ou encore, si elles consistent dans la sélection de cultures appropriées (le coton par exemple), supprimer tout risque pour la santé du consommateur. On peut par conséquent regrouper les mesures existantes en matière de protection sanitaire sous quatre rubriques principales :

- traitement des déchets;
- limitation des cultures autorisées;
- méthodes d'épandage des déchets;
- limitation de l'exposition humaine.

Les points au niveau desquels les mesures ci-dessus peuvent interrompre les voies potentielles de transmission d'agents pathogènes excrétés sont indiqués sur la figure 7.1.

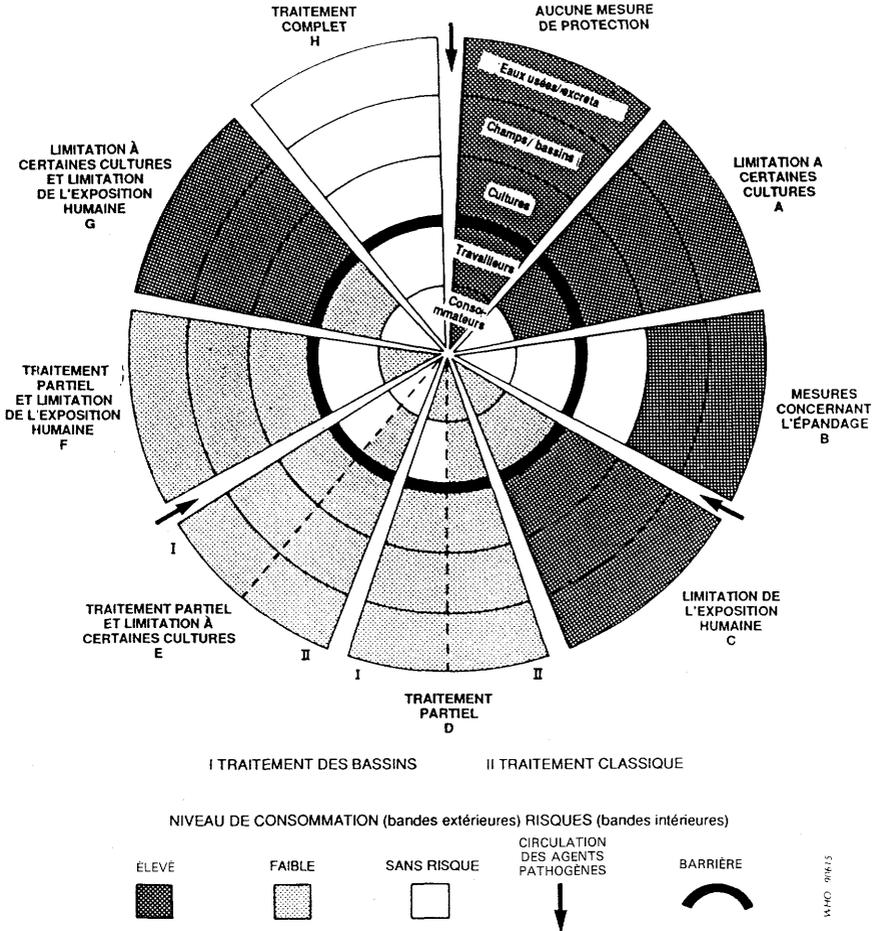
Souvent, il est souhaitable de combiner plusieurs de ces méthodes. Par exemple, la limitation à certaines cultures suffit parfois à protéger les consommateurs, mais des mesures complémentaires sont indispensables pour protéger les ouvriers agricoles. Dans certains cas, un

Fig. 7.1 Interruption grâce aux mesures de protection sanitaire, des voies potentielles de transmission d'agents pathogènes excrétés



traitement partiel, correspondant à des normes moins exigeantes, suffit s'il est associé à d'autres mesures. Cette idée est illustrée de façon schématique sur la figure 7.2 qui représente trois associations possibles de mesures qui assurent une protection efficace de la santé des travailleurs comme des consommateurs. La faisabilité et l'efficacité d'une association particulière dépendent de nombreux facteurs qu'il faut soigneusement peser avant de mettre en pratique telle ou telle solution. Ces facteurs sont les suivants:

Fig. 7.2 Modèle généralisé représentant l'importance des dangers pour la santé humaine résultant de diverses combinaisons de mesures de protection lors de l'utilisation d'eaux résiduaires ou d'excreta en agriculture ou en aquaculture



- existence de ressources (main-d'œuvre, fonds, terres);
- pratiques sociales et agricoles en vigueur;
- types actuels de maladies associées aux excreta.

Par exemple, lorsqu'on ne dispose pas de l'argent ni des terrains nécessaires pour pousser le traitement des eaux résiduaires jusqu'au niveau de qualité recommandé à Engelberg pour l'irrigation sans limi-

tation (voir tableau 4.5, page 86), il faut mettre en œuvre des mesures de protection sanitaire relevant des trois autres catégories. Dans certains cas, la limitation de la méthode à certaines cultures rend inutile toute autre mesure visant à protéger le public. En revanche, si la pénurie de personnel et la nature des pratiques en vigueur font qu'il est impossible d'assurer le respect des limitations ainsi imposées, il faut recourir à d'autres méthodes. Dans le cas de l'aquaculture, on peut négliger le critère de qualité imposé pour les déchets (voir tableau 4.7, page 97) s'il n'existe pas de parasitoses à trématodes dans la région en cause. Une attention particulière s'impose pour les systèmes de réutilisation à petite échelle, spécialement dans le cas des excréta. Il s'agit souvent de systèmes mis en œuvre dans l'agriculture ou l'aquaculture de subsistance, de sorte que tout contrôle est difficile et qu'un traitement est généralement impossible; pour réduire au minimum les risques au niveau individuel, il faut souvent appliquer diverses mesures, notamment dispenser une éducation pour la santé et améliorer l'approvisionnement en eau des foyers.

Les facteurs techniques qui influent sur chaque solution sont examinés ci-après. Les facteurs administratifs et financiers, qui n'ont pas moins d'importance, font l'objet de la section 8.

## 7.2 Traitement des déchets

### 7.2.1 Objectifs

Le traitement des eaux résiduaires et des excréta en vue de leur utilisation en agriculture ou en aquaculture a pour objectif d'en éliminer les agents pathogènes excrétés et, de la sorte, d'empêcher la transmission de maladies. Tel n'est pas cependant l'objectif fixé à l'origine aux systèmes classiques de traitement des eaux résiduaires, tels qu'ils sont normalement utilisés en Europe et en Amérique du Nord. Au départ, on se proposait avant tout d'éliminer des matières organiques, dont la concentration s'exprime par la demande chimique ou biochimique d'oxygène, ainsi que les substances solides en suspension. Depuis quelques années, par suite d'une meilleure sensibilisation au problème que pose la pollution de l'environnement, on a ajouté au système classique des procédés de traitement tertiaire complexes pour améliorer l'élimination des agents pathogènes. Les bassins de stabilisation constituent une méthode beaucoup plus simple pour obtenir ce dernier résultat.

Lorsqu'on envisage de débarrasser les déchets de leurs agents pathogènes, le paramètre important est davantage le nombre d'agents pathogènes survivants que le nombre d'agents éliminés ou détruits. Un taux

d'élimination de 99 ou de 99,9% par exemple semble très impressionnant, mais il correspond à un taux de survie de 1% ou de 0,1% respectivement, ce qui peut représenter une proportion non négligeable quand on sait la valeur que peut atteindre la concentration des agents pathogènes. Dans des effluents bruts, cette concentration peut dépasser  $10^5$  bactéries par litre de sorte qu'un taux d'élimination de 99% laisse encore subsister plus de  $10^3$  bactéries pathogènes par litre.

Il est donc préférable d'exprimer le taux d'élimination assuré par un procédé de traitement des déchets sous forme d'unités  $\log_{10}$  : un taux de 99%, par exemple équivaut à  $2 \log_{10}$ . Dans cette optique, la différence entre un procédé qui assure une élimination des agents pathogènes à la proportion de 92% et d'un autre dans la proportion de 98% est donc minime. En général, les eaux usées domestiques brutes contiennent environ  $10^7$  coliformes fécaux pour 100 ml et environ  $10^3$  œufs d'helminthes par litre dans les régions où les helminthiases sont fréquentes. Pour obtenir une qualité conforme au critère d'Engelberg pour l'irrigation sans limitation, il faut donc éliminer les bactéries dans la proportion d'au moins  $4 \log_{10}$  et les œufs d'helminthes dans la proportion de  $3 \log_{10}$ .

Un taux d'élimination moins poussé est envisageable si l'on prévoit d'autres mesures de protection sanitaire ou si la qualité est appelée à s'améliorer après le traitement. Cela peut se faire par dilution dans une nappe ou un cours d'eau naturel, par entreposage prolongé ou par transport sur une longue distance dans un cours d'eau ou un canal. Le taux d'élimination des agents pathogènes par dilution est facile à estimer, mais le chiffre qu'il convient d'appliquer est celui qui correspond à la dilution minimale, obtenu à la saison sèche en débit d'étiage. La réduction du nombre d'agents pathogènes dans les réservoirs, les cours d'eau et les canaux dépend essentiellement de la durée et de la température, mais pas obligatoirement de la distance franchie vers l'aval. Dans un cours d'eau naturel à écoulement rapide, les agents pathogènes peuvent franchir 50 km en guère plus de 12 heures, ce qui ne constitue pas un délai suffisant pour entraîner une baisse notable de leur nombre.

## 7.2.2 Traitement des eaux résiduaires

Dans le contexte envisagé ici, à savoir la réutilisation des eaux résiduaires, l'élimination des agents pathogènes excrétés constitue le principal objectif du traitement. Pour être efficace, l'élimination exige la mise en œuvre d'un procédé spécialement conçu à cette fin ; l'élimination qui intervient de façon incidente dans d'autres procédés mis au point à d'autres fins est normalement trop peu efficace eu égard

## Encadré 7.1 Coût du traitement des eaux résiduaires

Un rapport récent de la Banque mondiale permet une comparaison économique détaillée des bassins de stabilisation, des bassins d'oxygénation, des fossés d'oxydation et des filtres bactériens. Les données nécessaires pour cette comparaison des coûts concernent la ville de Sanaa, en République Arabe du Yémen. Certaines hypothèses ont été retenues, par exemple l'utilisation de bassins de maturation à la suite du bassin d'oxygénation, et la chloration des effluents du bassin d'oxydation ou du filtre biologique, de façon que les quatre procédés fournissent un effluent de qualité bactériologique similaire rendant possible la réutilisation des effluents pour l'irrigation ou la pisciculture. Les installations sont conçues sur la base des hypothèses suivantes : population de 250 000 personnes, production d'effluents et  $DBO_5$  (demande biochimique d'oxygène, mesurée le cinquième jour du traitement) correspondant à respectivement 120 litres par jour et 40 g/jour respectivement, concentration des coliformes fécaux de  $2 \times 10^7$  à l'entrée pour 100 ml et concentration exigée à la sortie de  $1 \times 10^4$  pour 100 ml,  $DBO_5$  exigée à la sortie de 25 mg/litre. On trouvera dans le tableau ci-dessous les résultats du calcul de la superficie nécessaire à l'installation et de la valeur actuelle nette totale de chaque système (dans l'hypothèse d'un coût d'opportunité du capital égal à 12% et d'un prix du terrain égal à 5 dollars E.U. le mètre carré). Les bassins de stabilisation constituent le procédé le moins onéreux. Mais il est clair que la solution optimale dépend dans une très large mesure du prix du terrain : la valeur retenue ci-dessus (5 dollars le mètre carré) représente un prix raisonnable pour la construction d'immeubles bon marché dans les pays en développement.

Le montant indiqué pour les dépenses de fonctionnement comprend, dans le cas des deux dernières solutions, 0,22 million de dollars par an pour la chloration.

	Bassins de stabilisation	Bassin d'oxygénation	Fossé d'oxygénation	Traitement classique (filtres bactériens)
Coûts (millions de dollars E.U.)				
Investissements	5,68	6,98	4,80	7,77
Dépenses de fonctionnement	0,21	1,28	1,49	0,86
Profits (millions de dollars E.U.)				
Revenus de l'irrigation	0,43	0,43	0,43	0,43
Revenus de la pisciculture	0,30	0,30	—	—
Valeur actuelle nette (millions de dollars E.U.)	5,16	7,53	5,86	8,20
Superficie (ha)	46	50	20	25

Source : Arthur (1983).

**Tableau 7.1 Taux théorique d'élimination des bactéries et helminthes excrétés par divers procédés de traitement des eaux résiduaires**

Procédé de traitement	Taux d'élimination (unités log <sub>10</sub> )			
	Bactéries	Helminthes	Virus	Kystes
Sédimentation primaire				
Procédé ordinaire	0-1	0-2	0-1	0-1
Complété par voie chimique <sup>a</sup>	1-2	1-3 (E)	0-1	0-1
Boues activées <sup>b</sup>	0-2	0-2	0-1	0-1
Biofiltration <sup>b</sup>	0-2	0-2	0-1	0-1
Bassin d'oxygénation <sup>c</sup>	1-2	1-3 (E)	1-2	0-1
Fossé d'oxydation <sup>b</sup>	1-2	0-2	1-2	0-1
Désinfection <sup>d</sup>	2-6 (E)	0-1	0-4	0-3
Bassins de stabilisation <sup>e</sup>	1-6 (E)	1-3 (E)	1-4	1-4
Réservoirs d'entreposage des effluents <sup>f</sup>	1-6 (E)	1-3 (E)	1-4	1-4

E – La présence de cette lettre indique que, moyennant une bonne conception, et une exploitation correcte, les critères d'Engelberg peuvent être respectés.

<sup>a</sup> Des travaux complémentaires sont indispensables pour confirmer l'efficacité de ce procédé.

<sup>b</sup> Y compris une sédimentation secondaire.

<sup>c</sup> Y compris un bassin de décantation.

<sup>d</sup> Chloration, ozonisation.

<sup>e</sup> L'efficacité dépend du nombre de bassins installés en série.

<sup>f</sup> L'efficacité dépend de la durée de rétention, laquelle varie en fonction de la demande.

Source : Feachem et al. (1983).

au coût (voir encadré 7.1). L'élimination des agents pathogènes excrétés par les procédés de traitement des eaux résiduaires a fait l'objet d'une mise au point de Feachem et al. (1983). On trouvera au tableau 7.1 la récapitulation des données disponibles au sujet des bactéries et des helminthes excrétés, avec indication des procédés pour lesquels les critères d'Engelberg peuvent être respectés. Le taux d'élimination des virus et des kystes est également indiqué dans ce tableau, bien qu'il n'ait aucun rapport avec la possibilité de satisfaire ou non aux critères d'Engelberg.

## Traitement classique (primaire et secondaire)

Les eaux résiduaires brutes contiennent  $10^7$ - $10^9$  coliformes fécaux par 100 ml, de sorte qu'il est clair, d'après le tableau 7.1, que les procédés classiques (sédimentation ordinaire, boues activées, biofiltration, bassins d'oxygénation et fossés d'oxydation) ne permettent pas, sans désinfection supplémentaire, de produire un effluent conforme aux critères d'Engelberg pour la qualité bactérienne ( $< 1\ 000$  coliformes fécaux pour 100 ml).

**Tableau 7.2 Efficacité d'une série de cinq bassins de stabilisation dans le nord-est du Brésil (température moyenne du bassin: 26 °C)**

Echantillon	Durée de rétention (jours)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Matières solides en suspension (mg/l)	Coli-formes fécaux	Œufs de nématodes intestinaux (par litre)
Eaux résiduaires brutes	—	240	305	$4,6 \times 10^7$	804
Effluent à la sortie du :					
Bassin anaérobie	6,8	63	56	$2,9 \times 10^6$	29
Bassin facultatif	5,5	45	74	$3,2 \times 10^5$	1
Bassin de maturation n° 1	5,5	25	61	$2,4 \times 10^4$	0
Bassin de maturation n° 2	5,5	19	43	450	0
Bassin de maturation n° 3	5,8	17	45	30	0

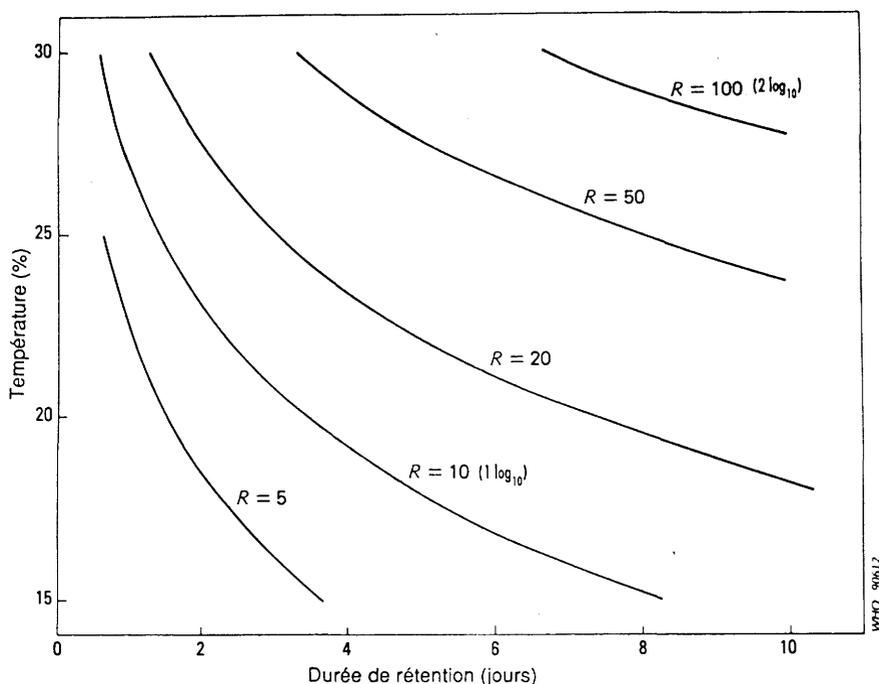
Source: Mara et al. (1983), Mara & Silva (1986).

Les procédés classiques de traitement des eaux résiduaires sont en général inefficaces s'agissant d'éliminer les œufs d'helminthes. Des travaux de recherche et développement sont indispensables pour améliorer l'élimination des œufs d'helminthes avec le système classique, de façon à satisfaire aux critères d'Engelberg. Divers procédés méritent des études complémentaires: l'adjonction de chaux, la coagulation chimique suivie d'une sédimentation, le voile anaérobie de boues en décantation, traversées de bas en haut, la filtration sur sable et l'entreposage dans des réservoirs à plusieurs compartiments.

## Bassins de stabilisation

Le procédé des bassins de stabilisation constitue généralement la méthode de choix pour le traitement des eaux résiduaires dans les pays chauds où l'on dispose facilement de terrains à un coût raisonnable (Mara, 1976; Arthur, 1983). Ces bassins doivent être disposés en série, associant des bassins anérobies, facultatifs et de maturation qui assurent une durée totale de rétention hydraulique de 10-50 jours, selon la température prévue lors de la construction et selon la qualité exigée pour les effluents. Il est facile de concevoir une série de bassins qui produisent des effluents conformes aux critères de qualité d'Engelberg, tant pour les bactéries que pour les helminthes; ces effluents ont

**Fig. 7.3 Réduction du nombre de coliformes fécaux dans les bassins de stabilisation, en fonction de la durée pour diverses valeurs du taux de réduction**



**Tableau 7.3 Qualité des effluents obtenus avec divers systèmes de bassins de stabilisation en série, assurant chacun une durée de rétention supérieure à 25 jours**

Systèmes de bassins	Nombre de bassins en série	Qualité des effluents (CF/100 ml) <sup>a</sup>
Australie, Melbourne	8-11	100
Brésil, Campina Grande <sup>b</sup>	5	30
France, Porquerolles	3	100
Jordanie, Amman	9	30
Pérou, Lima	5	100
Tunisie, Tunis	4	200

<sup>a</sup> CF = Coliformes fécaux

<sup>b</sup> Centre expérimental de traitement biologique des eaux résiduaires (Extrabes).

Source : Bartone & Arlosoroff (1987).

par ailleurs une faible DBO et contiennent peu de substances solides en suspension (voir tableau 7.2).

Le taux de réduction du nombre de bactéries dans un bassin peut être estimé d'après la formule:

$$R = 1 + Kt$$

dans laquelle  $R$  est le rapport entre la concentration des coliformes fécaux dans l'effluent à l'entrée et dans l'effluent à la sortie,  $t$  la durée de rétention du bassin en jours (obtenue en divisant le volume par le débit) et  $K$  un coefficient représentatif de la vitesse de destruction des bactéries fécales, laquelle dépend de la température. Dans les bassins de maturation, on peut estimer sa valeur au moyen de la relation:

$$K = 2,6 (1,19)^{T-20}$$

où  $T$  est la température moyenne en degrés celsius. Lors de l'établissement du projet, on choisit normalement la température mensuelle moyenne du mois le plus froid de l'année (Mara, 1976). Dans les bassins facultatifs, la vitesse de destruction des bactéries est légèrement plus faible. Pour déterminer le taux de réduction dans une série de bassins, il suffit de faire le produit des taux de réduction correspondant pour les différents bassins en série:

$$R_s = R_1 R_2 R_3 \dots$$

La relation entre température, durée de rétention et taux de rétention  $R$  pour un seul bassin est représentée par la figure 7.3.

Le taux de réduction  $R$  correspond au rapport du nombre de coliformes fécaux dans les effluents à l'entrée et à la sortie du bassin.

Pour une même durée totale de rétention, on obtient un meilleur temps d'élimination des agents pathogènes avec un système de bassins raccordés en série qu'avec un seul bassin. Le tableau 7.3 donne des exemples de la qualité des effluents obtenus avec plusieurs bassins en série. Dans chacun de ces systèmes, la durée totale de rétention dépassait 25 jours mais, dans bien des cas, on pourrait abaisser cette durée sans que les critères d'Engelberg cessent d'être respectés.

D'après des travaux récents conduits dans le nord-est du Brésil (Mara & Silva, 1986), il est en principe possible d'assurer le respect des critères d'Engelberg concernant les helminthes en installant trois bassins en série — un bassin anaérobie ayant une durée de rétention de 1 jour suivi de deux bassins (un bassin facultatif et un bassin de matu-

ration) assurant une rétention de 5 jours chacun. Avec cette installation, on obtient une réduction de la concentration des coliformes fécaux de  $2-3 \log_{10}$  seulement selon la température, de sorte qu'une maturation ultérieure est indispensable pour atteindre la valeur d'Engelberg, soit moins de 1 000 pour 100 ml. La dimension et le nombre des bassins de maturation déterminent le nombre de coliformes fécaux dans l'effluent final, à la sortie du système, et l'on choisit au stade de la conception (voir Gambrill et al., 1986) la combinaison optimale (nombre et dimension de ces bassins de maturation) pour obtenir la qualité souhaitée dans l'effluent final.

Les systèmes à plusieurs bassins présentent notamment l'intérêt d'assurer la production d'un effluent final conforme aux critères d'Engelberg, et cela avec une grande fiabilité. Mais ces bassins ont bien d'autres avantages:

- coûts plus faibles (qu'il s'agisse de la construction, de l'exploitation ou de l'entretien) que pour les autres procédés de traitement;
- aucune dépense d'énergie (l'énergie solaire suffit);
- résistance élevée aux surcharges brusques, organiques et hydrauliques;
- très grande simplicité d'exploitation et d'entretien;
- capacité d'assurer le traitement de déchets industriels et agricoles très variés.

Le seul inconvénient des ensembles de bassins est qu'ils nécessitent une superficie relativement importante, ce qui peut en limiter l'emploi, spécialement dans les grandes métropoles. Une méthode possible pour réduire la superficie nécessaire consiste à augmenter la profondeur des bassins: des travaux récents (Oragui et al., 1987; Mara et al., 1987) montrent que des bassins de 2-3 m de profondeur éliminent les bactéries et les virus dans une proportion comparable à celle qu'on obtient avec un bassin de profondeur classique (1-1,5 m). Des travaux complémentaires sont nécessaires à la recherche d'autres méthodes permettant de ramener au minimum la superficie nécessaire, par exemple l'emploi de bassins parallèlement à d'autres méthodes exigeant une moindre superficie, comme un traitement au niveau du sol ou d'un aquifère. Mais la gestion et l'entretien posent alors des problèmes nettement plus complexes. Dans de nombreux cas, le procédé classique du système de bassins constitue la meilleure méthode pour obtenir, à partir d'eaux résiduaires, un effluent utilisable pour l'irrigation.

## Traitement tertiaire

A l'origine, les traitements tertiaires ont été mis au point pour améliorer la qualité de l'effluent secondaire (procédé des boues activées ou filtre bactérien), le but étant principalement d'abaisser encore la DBO et la concentration des matières solides en suspension, ou d'éliminer les éléments nutritifs; pourtant, certains procédés (par exemple la désinfection) avaient pour objectif de réduire le nombre d'agents pathogènes excrétés.

Les procédés qui ont pour but d'améliorer la qualité physico-chimique — par exemple la filtration rapide sur sable, la nitrification-dénitrification et l'adsorption sur charbon actif — ne contribuent guère, sinon pas du tout, à éliminer les bactéries excrétées, mais certains d'entre eux (par exemple la filtration) permettent d'éliminer les helminthes; des travaux complémentaires sont indispensables pour fournir des données fiables aux projeteurs. Cependant, ces procédés sont généralement complexes et coûteux si bien que leur utilisation ne serait pas justifiée dans les pays en développement en vue d'obtenir des effluents utilisables pour l'irrigation.

## Désinfection

La désinfection — en général par chloration — des effluents bruts n'a jamais tellement donné satisfaction en pratique. Elle permet de réduire le nombre de bactéries excrétées dans l'effluent à la sortie d'une installation classique de traitement fonctionnant bien. Il faut en général une dose de chlore de 10-30 mg/l et une durée de contact de 30-60 minutes. La dose nécessaire doit être contrôlée au laboratoire car elle varie beaucoup avec la concentration des matières organiques dans les déchets.

Cependant, comme l'a souligné Chambers (1971): «La chloration des effluents d'une station de traitement des eaux résiduaires représente une opération infiniment plus complexe et d'efficacité beaucoup plus aléatoire que la chloration des eaux d'adduction. Il est extrêmement difficile de maintenir l'efficacité de la désinfection à un niveau élevé, uniforme et prévisible dans une opération de traitement des déchets, sauf si celle-ci fonctionne avec un maximum d'efficacité.» Dans ces conditions, il ne faut pas considérer qu'il y ait là une solution viable en matière de traitement sauf si une rigueur absolue est garantie au niveau de la gestion et de la régulation du processus; une désinfection irrégulière ou insuffisante n'aurait pas grand intérêt dans l'optique de la protection de la santé. En toute hypothèse, la chloration est totalement dépourvue d'effets sur la plupart des œufs d'helminthes

et n'a pas grande chance d'éliminer les kystes de protozoaires (Feachem et al., 1983).

Le milieu obtenu à la suite de la chloration d'un effluent, à la sortie de l'installation de traitement, est riche en éléments nutritifs et peu actif sur le plan microbiologique, de sorte qu'il est idéal pour la croissance de certaines bactéries excrétées. Certaines espèces, notamment les coliformes, prolifèrent parfois après chloration jusqu'à atteindre un effectif mille fois plus nombreux qu'après le traitement initial (Feachem et al., 1983). En outre, la chloration de l'effluent contribue à la formation et à la prolifération dans l'environnement de dérivés organiques chlorés qui peuvent être toxiques pour la flore et la faune aquatiques, notamment les poissons (Water Research Centre, 1979). Cependant, aucun problème grave n'a été encore signalé au sujet de la prolifération des coliformes ou des dérivés organiques chlorés lors de l'utilisation des effluents en agriculture.

Un problème plus grave est celui du coût du chlore — dont le prix est actuellement de l'ordre de 1 dollar E.-U. le kilogramme. La désinfection de l'effluent à la sortie d'une installation de traitement d'eaux résiduaires reviendrait, même pour une unité de dimension réduite d'une capacité de 10 l/s., à 10 000 dollars environ, uniquement pour le chlore (utilisé à la dose de 30 mg/l), auxquels il faut ajouter le prix de la main-d'œuvre et de l'équipement. Dans de nombreux pays, ces dépenses doivent être réglées en devises. On peut également utiliser d'autres désinfectants comme le brome et l'ozone, seuls ou associés au chlore. La dépense est en général encore plus élevée, sans gain appréciable d'efficacité.

## **Bassins de finissage**

Un procédé de traitement tertiaire beaucoup plus approprié consiste à ajouter, à la sortie d'une installation de traitement classique, un ou plusieurs bassins en série. Ces bassins sont pratiquement identiques aux bassins de maturation d'un ensemble de bassins de stabilisation et ils sont conçus de la même façon, dans le but d'obtenir le taux d'élimination souhaité pour les bactéries et helminthes excrétés. Ce procédé convient particulièrement bien aux pays en développement car il est fiable et n'exige que très peu d'entretien si l'installation est bien conçue et construite. Les opérations d'entretien sont simples et rappellent davantage le jardinage que le génie civil.

L'adjonction de bassins de finissage constitue une solution convenable pour améliorer une installation de traitement des eaux résiduaires déjà en place (voir section 7.2.5).

## Réservoirs d'entreposage

La demande d'eau d'irrigation est généralement concentrée à la saison sèche ou à certaines époques de la campagne agricole, alors que le débit d'eaux résiduaires est relativement constant. Il est donc fréquent qu'on utilise de grands réservoirs, souvent constitués en édifiant un barrage sur des cours d'eau naturels, pour stocker les eaux résiduaires en attendant qu'on en ait besoin. Des réservoirs de ce type sont utilisés au Mexique et en Israël (Shuval et al., 1986). Ces réservoirs assurent un traitement complémentaire, améliorant notamment la qualité bactériologique et parasitologique. Pour l'instant, on ne dispose pas de données pratiques suffisantes sur leur efficacité pour définir un processus théorique rationnel, mais il est clair que l'élimination des agents pathogènes est plus complète lorsqu'on subdivise les réservoirs en compartiments, raccordés en série, pour réduire l'importance des « courts-circuits ». L'élimination des agents pathogènes est d'autant plus efficace que les compartiments sont nombreux et la durée minimale de rétention plus longue.

Dans le cas d'un réservoir de stockage sans compartiments, un minimum de traitement préalable est souvent nécessaire. Une solution prudente, qu'on peut sans doute recommander, serait d'assurer une durée minimale de rétention hydraulique de 10 jours pendant la saison d'irrigation et d'admettre que les coliformes fécaux comme les œufs d'helminthes ne sont éliminés qu'à hauteur de  $2 \log_{10}$ . Dans ces conditions, l'effluent rejeté dans les réservoirs ne devrait pas contenir plus de 100 œufs d'helminthes par litre et, si l'eau doit être utilisée pour une irrigation sans limitation, pas plus de 100 000 coliformes fécaux pour 100 ml pendant la période d'irrigation.

## Qualité physico-chimique des eaux résiduaires traitées

La qualité physico-chimique des eaux résiduaires domestiques traitées, spécialement pour ce qui est de leur conductivité électrique et du taux d'adsorption du sodium (TAS), satisfait normalement aux limites recommandées par la FAO pour les eaux d'irrigation (voir Ayers & Westcot, 1985). C'est uniquement si les eaux traitées dans les bassins contiennent une proportion importante d'eaux résiduaires industrielles qu'il faut s'en assurer et vérifier par ailleurs que l'effluent final ne contient pas de phytotoxines à une concentration nocive, spécialement du bore et des métaux lourds. Au cas où les eaux résiduaires traitées auraient un TAS trop élevé, il faut envisager de le réduire en mélangeant les eaux résiduaires à une eau (ou une eau résiduaire) de TAS plus faible; en pareil cas, mieux vaut en général utiliser le TAS corrigé (Ayers & Westcot, 1985).

Il est inutile de retirer les algues contenues dans les effluents des bassins (puisqu'elles se comportent dans le sol comme un engrais à libération lente), sauf si elles risquent, en cas d'irrigation localisée, d'aggraver les problèmes de colmatage des éjecteurs.

### 7.2.3 Traitement des excreta

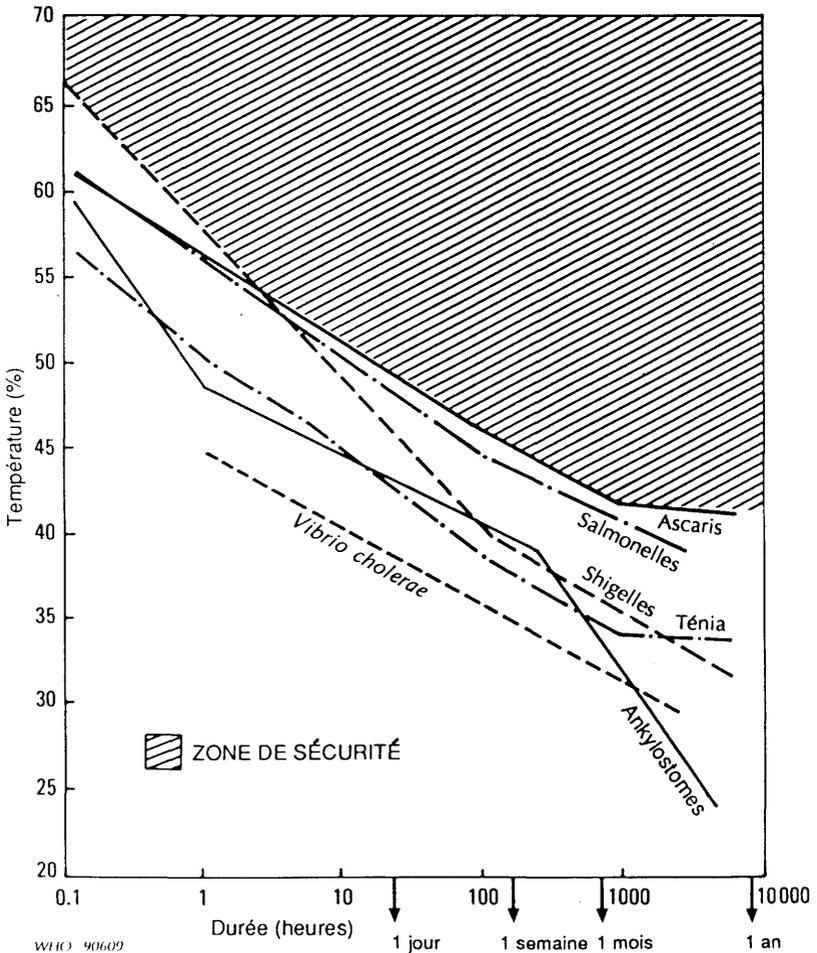
Aucun traitement n'est nécessaire pour les excreta ou les produits qui en dérivent (par exemple les boues de fosses septiques ou les boues résultant du traitement des eaux résiduaires) lorsqu'ils sont épandus par injection sous la surface du sol ou déposés dans des tranchées avant le début de la période de végétation, comme on l'a décrit à la section 4.4.2. Dans le cas des autres méthodes d'épandage, un traitement est nécessaire afin d'assurer le respect des critères de qualité d'Engelberg.

Pour parvenir à la qualité recommandée dans les cas des helminthes ( $< 1$  œuf viable de nématode intestinal pour 100 g), il faut entreposer les excreta à traiter pendant au moins un an à la température ambiante (voir figure 7.4). Cette durée vise le laps de temps total qui s'écoule entre l'excrétion et l'épandage sur le sol, de sorte qu'elle inclut le temps passé, par exemple, dans une latrine à fosse ou dans une installation de traitement tel qu'un digesteur anaérobie ou une installation de compostage. La durée d'entreposage peut être raccourcie si le traitement est opéré à une température plus élevée, par exemple dans un système de compostage aérobie.

Le contenu des latrines à deux fosses utilisées tour à tour (qu'il s'agisse d'une latrine améliorée à fosse autoventilée ou d'une latrine à chasse d'eau) n'a pas besoin de traitement complémentaire avant d'être épandu sur le sol, après vidange de la fosse, à condition que cette vidange ne soit pas effectuée plus d'une fois par an. Certains types de latrines à double fosse, comme celles qu'on utilise au Guatemala et au Viet Nam, sont en principe vidangées plus fréquemment après avoir été remplies puis hermétiquement fermées. Si l'on veut que les critères d'Engelberg soient satisfaits, il faut entreposer ces déchets un certain temps de façon que tous les déchets soient vieux d'au moins un an quand ils sont utilisés.

Dans *tous* les cas, le contenu des latrines à une seule fosse, des fosses septiques, des latrines à compostage à un seul compartiment, ainsi que les boues résultant du traitement d'eaux résiduaires, doivent être stockés au moins un an après la vidange des installations d'assainissement ou de traitement, puisqu'il n'existe aucun moyen de faire la différence entre des excreta d'origine récente et des excreta ayant déjà subi une digestion.

**Fig. 7.4 Influence de la durée et de la température sur certains agents pathogènes – bactéries ou helminthes – présents dans les excreta et les boues**



Les lignes brisées correspondent à la limite de la zone où, pour l'agent considéré, le couple durée-température assure son inactivation à coup sûr. Un procédé de traitement qui associe une durée et une température qui sont les coordonnées d'un point situé à l'intérieur de la zone de sécurité devrait donc assurer la destruction de tous les agents excrétés, bactéries et helminthes.

D'après Feachem et al. (1983), reproduite avec l'autorisation de la Banque mondiale.

Pour les gadoues liquides (matières fécales et urines, souvent additionnées d'une petite quantité d'eau de chasse), une simple sédimentation suffit pour obtenir une qualité conforme aux critères concernant les helminthes. Cependant, une sédimentation primaire, du type classique, ne convient pas à cause de l'apport élevé de matières soli-

des; une méthode mieux adaptée consiste en un entreposage d'une semaine, après quoi on peut épandre le surnageant dans les champs. Pendant cette durée, la quasi-totalité des œufs d'helminthes décantent, de sorte que la manipulation du surnageant ne met guère en danger la santé du personnel agricole. Il est facile d'assurer cette durée de stockage si l'on dispose de trois citernes qu'on utilise tour à tour — la première étant pleine, la deuxième en décantation calme et la troisième en utilisation. Les boues qui se déposent au fond de la citerne sont très riches en œufs d'helminthes et doivent être traitées de la même façon que des excréta bruts, avec stockage pendant un an au moins ou traitement à température élevée. Comme ces boues ne doivent en aucun cas être directement épandues dans les champs, il faut incorporer aux citernes de stockage un dispositif simple qui interdise toute erreur (par exemple l'installation d'une grille juste au-dessus du niveau maximal atteint par les boues).

Au Japon, on utilise couramment pour le traitement des gadoues une digestion mésophile anaérobie suivie d'un traitement par le procédé des boues activées ou d'un traitement dans des bassins de stabilisation, encore qu'il devienne de plus en plus fréquent de faire précéder le traitement par le procédé de boues activées d'une digestion thermophile aérobie. Mais il s'agit de procédés coûteux, consommant beaucoup d'énergie et nécessitant une exploitation et un entretien rigoureux, de sorte qu'en général ils ne conviennent pas pour des pays en développement. Une solution plus simple consiste à traiter directement les gadoues et les boues de fosses septiques dans des bassins de stabilisation.

### **Traitement des excréta à haute température**

Il existe deux méthodes de traitement des excréta à haute température qui permettent de réduire la durée minimale de stockage, qui est en principe de 12 mois. Ces méthodes assurent aussi l'élimination des coliformes fécaux et celle des helminthes, jusqu'à l'obtention d'une qualité conforme au critère d'Engelberg:

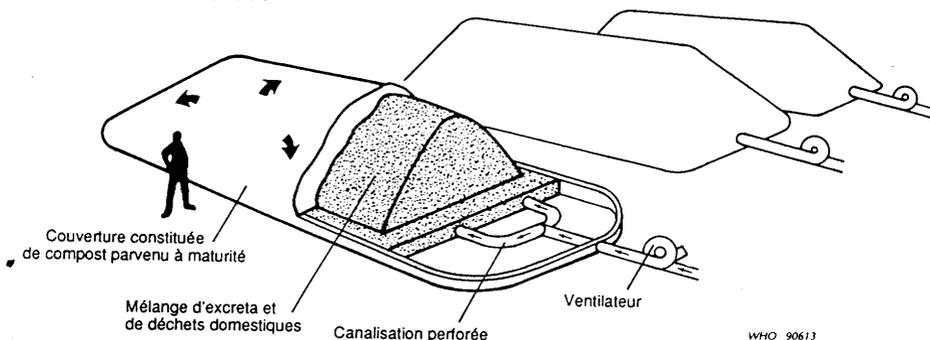
- a) **Digestion thermophile en discontinu** à 50 °C pendant 13 jours, qui assure l'inactivation de tous les agents pathogènes. Une digestion en discontinu est nécessaire pour éviter les « courts-circuits » d'agents pathogènes — terme utilisé quand la durée de rétention dans les réacteurs est inférieure à la durée nécessaire à l'inactivation de ces agents.

- b) **Compostage sous ventilation forcée:** le compostage des excréta se fait en même temps que celui des déchets domestiques sous forme de tas statiques ventilés (voir figure 7.5) pendant un mois, de sorte que la température atteint 55-60 °C. La poursuite de la maturation à la température ambiante pendant 2-4 mois aboutit à la production d'un compost stable et exempt d'agents pathogènes, qu'on peut utiliser de façon générale en aquaculture et en agriculture. Au lieu des déchets domestiques, on peut utiliser comme autres matériaux de charge des copeaux de bois ou des balles de riz, par exemple; mais, pour des raisons écologiques et du point de vue des municipalités, l'utilisation des déchets domestiques constitue souvent la meilleure solution. La ventilation forcée n'est pas indispensable pour le compostage (Gotaas, 1956): il est probablement préférable d'y renoncer pour les exploitations de petite dimension, mais, dans ce cas, la destruction des agents pathogènes n'est pas toujours aussi poussée ni aussi fiable (voir encadré 7.2).

Le compostage des excréta a plusieurs autres avantages:

- il évite les mauvaises odeurs et la prolifération de mouches qui résultent d'un entreposage des excréta bruts avant épandage;
- il préserve les nutriments;
- il empêche l'endommagement des racines qui résulte de la stabilisation sur place des matières organiques et de la libération corrélative d'ammoniac libre qui se produit lorsque des excréta bruts sont épandus sur le sol;
- le compost parvenu à maturité contribue à la destruction des agents phyto-pathogènes;

**Fig. 7.5** Vue schématique éclatée des tas statiques utilisés pour le compostage d'un mélange d'excreta et de déchets domestiques, sous ventilation forcée



## Encadré 7.2 Sous ventilation forcée compostage d'excreta additionnés d'un matériau de charge

Il est difficile d'obtenir un bon compost à partir d'excreta (gadoues) ou de boues résultant du traitement d'eaux résiduaires : il s'agit de matières trop humides et dont le rapport carbone/azote est trop faible. Il faut ajouter un matériau de charge capable d'absorber l'humidité excédentaire et de corriger le rapport C : N - par exemple des déchets, de la paille ou des balles de riz.

Des travaux récents (Stentiford & Pereira Neto, 1985 ; Pereira Neto et al., 1986 ; 1987) ont abouti au procédé simple ci-dessous pour ce compostage mixte :

### Phase en tas aérés

- a) Les matériaux qui doivent être compostés simultanément (granulométrie de 20-50 mm) sont mélangés de façon à obtenir un rapport C:N égal à 25-35 et un degré d'humidité de 50-55%.
- b) Le tas statique est édifié au-dessus d'une canalisation en matière plastique perforée. Dimensions du tas : 1,5-2 m de hauteur, 2-4 m de largeur et 10-50 m de longueur. Le tas est recouvert d'une couche isolante et filtrante constituée de compost, de 100 mm d'épaisseur.
- c) Un ventilateur d'une puissance de 250-370 W fait circuler de l'air dans la canalisation afin de maintenir des conditions aérobies à l'intérieur du tas. Le ventilateur fonctionne 3-5 minutes toutes les 15-20 minutes.
- d) A mesure que la température s'élève, le ventilateur sert à la fois à aérer le tas et à y uniformiser la température. Dans son principe, il assure un transfert de chaleur entre la partie centrale, plus chaude, et la partie périphérique, plus fraîche, évitant ainsi que la chaleur s'accumule au centre et amène la température à plus de 60 °C, ce qui serait nocif pour les micro-organismes thermophiles responsables du compostage.
- e) La température est contrôlée au cours de la phase thermophile, à la fois dans la partie centrale et sur les bords ; quand les deux valeurs ainsi mesurées tombent à 35 °C, on peut démolir le tas.

### Phases de maturation

- f) Les matériaux provenant du tas sont entreposés pendant encore 2-4 mois, la durée précise dépendant de la température ambiante, pour permettre l'humification des composés riches en carbone, telles que la lignine et la cellulose.

Après maturation, le compost est passé au crible de façon à éliminer les fragments de dimension supérieure à 5-10 mm, après quoi il peut être utilisé en agriculture et en horticulture.

- le compost parvenu à maturité retient l'humidité et, du même coup, réduit au minimum la pollution des eaux souterraines, spécialement par les nitrates;
- la structure du sol est très améliorée et il est facile d'obtenir un bon ameublissement du sol.

## 7.2.4 Traitement en vue de l'aquaculture

### Eaux résiduaires

Lorsqu'on envisage leur utilisation dans la culture de macrophytes aquatiques, les eaux résiduaires doivent être traitées de façon à obtenir la qualité recommandée, soit 0 œuf de trématode par litre (voir tableau 4.7, page 97); on y parvient facilement dans des bassins de stabilisation (voir section 7.2.2). Les effluents d'une installation de traitement classique doivent séjourner 5 jours dans un bassin de finissage (maturation) unique. Pour la pisciculture, il faut en outre obtenir, par traitement dans des bassins de maturation ou par désinfection, un nombre de coliformes fécaux inférieur à 1 000 par 100 ml (voir section 4.4.3).

### Excreta

Le traitement des excréta doit aboutir à la même qualité que pour les eaux résiduaires. L'entreposage à la température ambiante dévitalise les œufs de trématode; il doit au minimum durer:

- 1 semaine pour *Clonorchis sinensis*
- 3 semaines pour *Fasciolopsis buski*
- 4 semaines pour *schistosoma* sp

Pour une exploitation modeste, on peut utiliser la méthode de la triple fosse de stockage (voir section 7.2.3), tandis que pour les exploitations plus importantes, il est généralement moins coûteux de faire appel au compostage sous ventilation forcée ou à la digestion thermophile en discontinu.

Pour atteindre la qualité recommandée de moins de 1 000 coliformes fécaux pour 100 ml, il faut que les excréta soient traités par compostage ou digestion ou encore dans une série de bassins facultatifs ou de bassins de maturation, avec adjonction d'eau pour compenser les pertes par évaporation et assurer un débit suffisant à l'intérieur de l'installation de traitement.

## Entretien des bassins

Pour détruire les gastéropodes qui constituent le premier hôte intermédiaire des trématodes susceptibles d'être transmis par aquaculture, il suffit de détruire la végétation qui pousse sur les bords des bassins de pisciculture. Autrement, cette végétation constituerait un abri ombragé adapté aussi bien aux gastéropodes qu'aux culicinés (moustiques qui peuvent être les vecteurs locaux de la bancroftose). Mais cette méthode ne convient évidemment pas dans le cas des bassins où l'on fait pousser des macrophytes, auquel cas un traitement approprié représente la seule méthode efficace (l'épandage de molluscicides est impraticable pour des questions de coût). La prolifération des moustiques dans les bassins de culture de macrophytes doit être limitée par l'introduction de poissons larvivores tels que les *Gambusia* et les *Poecilia*.

### 7.2.5 Amélioration d'une installation de traitement déjà en place

Les installations de traitement des eaux résiduaires déjà en place doivent parfois être améliorées de façon à produire un effluent acceptable. Une solution efficace, lorsqu'on dispose du terrain nécessaire, consiste à y ajouter un bassin de finissage avec durée de rétention de 5 jours (pour l'élimination des œufs d'helminthe) ou des bassins de maturation supplémentaire, de façon à améliorer l'élimination des coliformes fécaux). A défaut, on peut recourir à la désinfection ou à une sédimentation secondaire facilitée par voie chimique; dans ce dernier cas, la chaux ou un coagulant à base de chaux ont l'avantage, par rapport aux autres produits chimiques, de tuer les bactéries fécales tout en éliminant les œufs d'helminthe, mais il faut amener le pH de l'effluent à une valeur inférieure à 8,4, par addition d'acide sulfurique ou par recarbonation en cascade.

## 7.3 Limitation à certaines cultures et certains poissons

### 7.3.1 Utilisation d'eaux résiduaires en agriculture

Les eaux résiduaires dont la qualité, à la suite d'un traitement, répond aux critères d'Engelberg en vue d'une utilisation sans limitation (<1 000 coliformes fécaux pour 100 ml et  $\leq 1$  œuf viable de nématode par litre) peuvent être utilisées pour irriguer n'importe quelle culture, sans autre mesure de protection sanitaire. Si la norme n'est

pas pleinement satisfaite, il reste possible d'utiliser l'eau pour certaines cultures sans risques pour la santé du consommateur. Certaines mesures complémentaires sont nécessaires pour protéger le personnel d'exploitation agricole et ceux qui manipulent les produits après la récolte, mais parfois aussi pour protéger totalement les consommateurs.

Les plantes peuvent être réparties en trois grandes catégories en fonction de l'importance des mesures de protection nécessaires (Shuval et al., 1986).

### **Catégorie A — Protection nécessaire pour le personnel d'exploitation agricole uniquement**

1. Plantes non destinées à la consommation humaine (par exemple coton, sisal)
2. Plantes normalement traitées par un procédé thermique ou par dessiccation avant leur consommation par l'homme (céréales, oléagineux, betteraves à sucre)
3. Légumes et fruits exclusivement destinés à être consommés après mise en boîte ou après un autre traitement détruisant efficacement les agents pathogènes
4. Plantes fourragères séchées au soleil et ramassées avant d'être consommées par les animaux
5. Irrigation de zones encloses, où le public n'a pas accès (pépinières, forêts, espaces verts).

### **Catégorie B — Autres mesures de protection parfois nécessaires**

1. Pâturages, cultures de fourrages verts
2. Plantes destinées à la consommation humaine et n'entrant pas en contact direct avec les eaux résiduaires à condition qu'elles ne soient pas ramassées sur le sol et que l'irrigation ne soit pas pratiquée par aspersion (arboriculture, vignobles, etc.)
3. Plantes destinées à la consommation humaine mais en principe consommées uniquement après cuisson (pommes de terre, aubergines, betteraves potagères)

4. Plantes destinées à la consommation humaine mais consommées sans leur peau (melons, agrumes, bananes, fruits à coque, cacahuètes)
5. N'importe quelle culture dès lors qu'on pratique l'irrigation par aspersion (voir section 7.4.1).

### **Catégorie C — Traitement essentiel jusqu'à obtenir une qualité conforme aux critères d'Engelberg pour l'irrigation sans limitation**

1. N'importe quelle plante pouvant être consommée crue et qui est cultivée en contact étroit avec des effluents obtenus à partir d'eaux résiduaires (légumes frais, tels que laitues ou carottes, ou fruits irrigués par aspersion)
2. Irrigation de zones auxquelles le public peut avoir accès (parcs, pelouses, terrains de golf).

L'irrigation qui n'est autorisée que pour certaines cultures et dans certaines conditions, comme c'est le cas pour la catégorie A, est souvent désignée sous le nom d'irrigation avec limitation.

La limitation à certaines cultures est une mesure qui vise à protéger les consommateurs. Elle a l'avantage de protéger les groupes de population moins résistants aux infections, y compris les personnes non résidentes, par exemple les touristes et les pèlerins. Mais elle n'assure pas la protection des travailleurs agricoles ni de leur famille lorsque les effluents utilisés pour l'irrigation sont de qualité médiocre. La limitation à certaines cultures ne constitue donc pas une mesure suffisante à elle seule mais elle doit s'intégrer dans un ensemble de mesures de protection. Pour assurer la protection du personnel d'exploitation comme celle des consommateurs, elle doit être complétée par d'autres mesures, par exemple un traitement partiel des déchets et leur épandage contrôlé ou une limitation de l'exposition humaine (voir Fig. 7.2).

Lorsque la qualité des effluents traités satisfait seulement au critère d'Engelberg concernant les helminthes, ce traitement partiel suffit la plupart du temps à protéger les ouvriers agricoles, et c'est une solution moins onéreuse qu'un traitement complet. Par exemple, un ensemble de bassins destinés à fournir une qualité conforme au critère relatif aux helminthes n'exige que 52-67% des surfaces nécessaires lorsqu'on veut en même temps respecter le critère concernant les coliformes fécaux, à des températures de 20-25 °C.

La limitation à certaines cultures est une méthode praticable et que diverses circonstances peuvent faciliter, en particulier dans les cas ci-dessous :

- respect de la loi par la société ou sévère répression des infractions ;
- existence d'un organisme public chargé de répartir les déchets et habilité par la loi à faire respecter les limitations prévues pour l'irrigation des cultures ;
- existence d'un système d'irrigation dirigé par un organisme central doté de pouvoirs étendus ;
- les plantes dont la culture est autorisée selon ce système, bénéficient d'une demande suffisante, parallèlement à un niveau raisonnable des cours ;
- demande du marché peu importante pour les plantes exclues (comme celles de la catégorie C).

Mais, en tout autre cas, il est difficile de faire respecter les limitations prévues. Les problèmes qui se posent à ce sujet sont étudiés plus à fond à la section 8.

### **7.3.2 Utilisation d'excreta en agriculture**

Comme dans le cas de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires, la limitation de l'utilisation des excreta comme engrais aux cultures de la catégorie A constitue un moyen valable pour éliminer tout risque pour la santé des consommateurs. S'agissant des ouvriers agricoles et du personnel chargé de la manipulation des produits récoltés, la principale méthode pour éliminer les risques consiste à traiter les excreta de façon que leur qualité satisfasse au critère d'Engelberg pour les helminthes ou à les épandre sur le sol selon une méthode adaptée (voir section 7.4.2). Lorsqu'on utilise des excreta comme engrais pour des cultures de la catégorie C, leur traitement doit être poussé de façon que tous les critères d'Engelberg soient respectés. Lorsque c'est impossible, on peut utiliser une eau de qualité moindre (mais ne contenant pas plus de 10 000 coliformes fécaux pour 100 ml) pour la fertilisation de cultures de la catégorie B, sous réserve que des précautions soient prises pour limiter l'exposition humaine (voir section 7.5.1).

### 7.3.3 Aquaculture

La limitation de l'utilisation des excreta et des eaux résiduaires à certaines cultures afin de réduire au minimum les risques pour la santé n'est pas une méthode aussi simple dans le cas de l'aquaculture que dans celui de l'agriculture. La plupart des macrophytes aquatiques et certains poissons sont en effet parfois consommés crus dans diverses régions du monde, notamment en Asie, de sorte que la solution adoptée en agriculture, à savoir l'exclusion des excreta ou des eaux résiduaires pour l'irrigation ou la fertilisation des plantes vivrières ou de celles qui sont consommées crues, est souvent impraticable car elle reviendrait à mettre fin aux pratiques traditionnelles en matière d'aquaculture. L'introduction de poissons qui ne sont pas mangés crus (par exemple des tilapias) dans ces régions est une solution envisageable mais, même dans ce cas, il serait sans doute difficile d'empêcher totalement les pratiques habituelles, spécialement dans le cas de l'aquaculture de subsistance à petite échelle.

Une méthode qui semble très prometteuse consiste à empoisonner les bassins où l'on utilise comme engrais des excreta ou des eaux résiduaires au moyen d'espèces sans grande valeur marchande, par exemple des tilapias, et à les donner ensuite à manger à des poissons (par exemple poissons-chats, muges) ou des crustacés (crevettes, écrevisses) de valeur que l'on élève dans des bassins d'eau non polluée. Les travaux effectués jusqu'ici ne permettent pas de savoir jusqu'à quel point les poissons élevés dans les eaux résiduaires peuvent être contaminés sans contaminer à leur tour les poissons ou crustacés qui sont élevés dans les eaux non polluées mais on peut recommander, en prévoyant une marge de sécurité, que les poissons sans valeur marchande soient élevés dans des bassins où le nombre de coliformes fécaux ne dépasse pas de plus d'un ordre de grandeur le nombre fixé comme critère au tableau 4.7 (c'est-à-dire moins de 10 000 pour 100 ml).

## 7.4 Epannage d'eaux résiduaires et d'excreta

### 7.4.1 Eaux résiduaires en agriculture

L'eau d'irrigation, y compris les eaux résiduaires traitées, peut être épanchée sur le sol selon cinq grandes techniques :

- par submersion (irrigation par calants), ce qui humidifie la quasi-totalité du sol;
- par infiltration «à la raie», ce qui n'humidifie qu'une partie de la surface;

- au moyen d'asperseurs, ce qui donne un résultat très analogue à celui de la pluie;
- par irrigation souterraine, auquel cas la surface est très peu humidifiée, sinon pas du tout, alors que le sous-sol est saturé;
- par irrigation localisée (au goutte-à-goutte ou au moyen de tubulures de refoulement), l'eau étant amenée directement au niveau de chaque plante, à un débit réglable.

Les avantages et les inconvénients généraux de ces techniques d'irrigation et leur adaptation aux différentes cultures et aux différents profils de terrain sont étudiés à fond dans un document de la FAO (Doneen & Westcot, 1984) auquel on pourra se reporter pour plus de précisions. Pour ce qui est de limiter la transmission des maladies, ces cinq méthodes d'épandage des eaux résiduaires ont les avantages et les inconvénients énumérés au tableau 7.4. Lorsque la qualité des eaux résiduaires traitées est conforme aux critères d'Engelberg, n'importe

**Tableau 7.4 Facteurs influant sur le choix d'une méthode d'irrigation et mesures particulières à prendre lorsqu'on utilise des eaux résiduaires**

<b>Méthode d'irrigation</b>	<b>Facteurs influant sur le choix</b>	<b>Mesures spéciales pour les eaux résiduaires</b>
Irrigation par calants (submersion)	Coût minimal, nivellement rigoureux inutile	Protection rigoureuse du personnel d'exploitation agricole, des manipulateurs des plantes récoltées et des consommateurs
Irrigation par infiltration « à la raie »	Faible coût, nivellement parfois nécessaire	Protection du personnel d'exploitation agricole et éventuellement des manipulateurs des plantes récoltées et des consommateurs
Irrigation par aspersion	Mode d'utilisation de l'eau moyennement efficace, nivellement inutile	Certaines cultures de la catégorie B sont à exclure, spécialement l'arboriculture. Un retrait d'au moins 50-100 m doit être observé par rapport aux habitations et aux routes. Les déchets anaérobies ne doivent pas être utilisés du fait de leur odeur désagréable.
Irrigation souterraine et irrigation localisée	Coût élevé, mode d'utilisation de l'eau extrêmement efficace, rendements maximaux	Filtration nécessaire pour empêcher le colmatage des éjecteurs

laquelle des cinq méthodes peut être utilisée sans danger, le choix étant fonction du coût, de l'approvisionnement en eau et de la pente du terrain.

Si l'eau est de qualité inférieure mais qu'on désire l'utiliser pour des cultures de la catégorie B (voir section 7.3.1.), il ne faut pas pratiquer l'irrigation par aspersion sauf pour les pâturages ou les cultures fourragères et il ne faut pas utiliser non plus l'irrigation par calants pour les cultures maraîchères.

L'irrigation souterraine ou l'irrigation localisée assurent la protection maximale sur le plan sanitaire et permettent d'utiliser l'eau de façon plus efficace et d'obtenir souvent des rendements supérieurs (voir encadré 7.3). Mais ces procédés sont coûteux et ne sont pas encore utilisés à grande échelle pour l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires. Un traitement très fiable (comportant en général une double filtration, d'une part à travers un lit filtrant épais et, d'autre part, à travers des filtres installés sur les canalisations) est indispensable pour empêcher le colmatage des petits orifices (éjecteurs) à travers lesquels l'eau s'écoule lentement sur le sol.

L'irrigation par tubulures de refoulement, technique mise au point pour l'irrigation localisée en arboriculture (voir Hillel, 1987), évite de prévoir de petits éjecteurs au niveau de chaque arbre pour régulariser le débit. Une tubulure verticale d'un diamètre de 6 mm est branchée sur la canalisation où circule l'eau, sous faible pression. Si besoin est, chaque tubulure est supportée par un petit piquet et elle est coupée à son extrémité supérieure, à une hauteur soigneusement choisie de façon à assurer un débit d'eau uniforme à la sortie, malgré les iné-

### **Encadré 7.3 Irrigation au goutte-à-goutte dans des plantations de coton, au moyen de l'effluent recueilli à la sortie d'un ensemble de bassins de traitement**

Un système d'irrigation au goutte-à-goutte a été installé dans une plantation de coton en vue d'étudier l'influence qu'exercent sur le rendement, la qualité de l'effluent produit par un système de traitement en bassins, le débit à la sortie de l'éjecteur et le régime d'irrigation. Les expériences se sont déroulées dans une zone aride caractéristique (la vallée de Beer-Sheva en Israël), le coton étant cultivé sur des loess. On a constaté qu'il est possible d'obtenir un rendement élevé, supérieur à 6 000 kg/ha, en pratiquant une irrigation en goutte-à-goutte à une fréquence élevée (une fois tous les deux jours). Au total, on utilisait environ 5 900 m<sup>3</sup> d'effluent par hectare, sans apport complémentaire d'engrais. Moyennant une filtration correcte par crépine, il n'y a pas eu de problème de colmatage au niveau des éjecteurs.

Source : Oron et al. (1982).

galités du sol. L'eau s'écoule dans une petite cuvette creusée au pied de chaque arbre ou buisson.

Lorsqu'on utilise des eaux résiduaires de qualité moindre, il est essentiel de respecter, en plus des limitations ci-dessus, les recommandations formulées à la section 7.5.1., en vue de réduire l'exposition humaine.

### **7.4.2 Excreta en agriculture**

L'épandage d'excreta non traités ou insuffisamment traités ne doit être pratiqué que par deux méthodes: déversement dans des tranchées recouvertes avant le début de la période de végétation (voir section 4.4.2) ou injection souterraine au moyen d'un équipement particulier (voir Water Research Centre, 1984). Quand les excreta ont subi un compostage correct, ils sont exempts d'agents pathogènes, de sorte qu'on peut les répandre sur le sol à la main ou par un procédé mécanique sans risques pour la santé. Les gadoues qui ont subi une décantation ou une digestion thermophile peuvent être répandues soit à la main (au moyen d'un seau et d'une sorte de grande louche, par exemple, conformément à une pratique courante en Chine), soit en utilisant une citerne (souvent tractée par un animal). Quand le traitement des gadoues a été insuffisamment poussé et que seul est respecté le critère d'Engelberg pour les helminthes, la concentration des bactéries et des virus pathogènes peut être élevée, de sorte que le personnel d'exploitation agricole est plus exposé que lors de l'utilisation d'eaux résiduaires pour l'irrigation avec limitation; la seule façon de réduire le risque est de limiter l'exposition.

### **7.4.3 Aquaculture**

Avant de mettre des fruits de mer sur le marché, on les fait couramment séjourner dans de l'eau pure pour les débarrasser des micro-organismes excrétés — procédé connu sous le nom de dépuración. La dépuración est souvent recommandée dans les systèmes d'aquaculture où l'on utilise comme engrais des excreta: elle peut être pratiquée soit en arrêtant l'introduction de déchets dans les bassins, soit en transportant les poissons et les fruits de mer dans un bassin d'eau pure. Dans le cas de poissons, un séjour d'au moins 2 ou 3 semaines dans ces bassins avant la pêche réduit la contamination par des germes fécaux, outre qu'elle fait disparaître les mauvaises odeurs résiduelles. Toutefois, cette dépuración ne garantit pas une élimination complète des agents pathogènes des tissus et de l'appareil digestif des poissons, sauf si la contamination est minime.

## 7.5 Limitation de l'exposition humaine

### 7.5.1. Agriculture

Quatre catégories de personnes sont *a priori* exposées lorsqu'on utilise des eaux résiduaires et des excréta en agriculture, à savoir :

- les ouvriers agricoles et leurs familles;
- les manipulateurs des plantes après la récolte;
- les consommateurs (de végétaux, de viande et de lait);
- les personnes habitant à proximité des champs en cause.

Le personnel d'exploitation agricole est exposé à un risque potentiel élevé, spécialement de parasitoses (voir section 4.3). On peut réduire le risque d'ankylostomiase, et même le supprimer, moyennant le port systématique de chaussures appropriées pendant les travaux aux champs, mais il est parfois difficile de persuader les ouvriers de prendre cette précaution. Un programme rigoureux d'éducation pour la santé est indispensable. Une démarche similaire est possible dans le cas des manipulateurs des plantes après la récolte; bien que le risque soit légèrement moins important pour eux que pour le personnel d'exploitation, il ne doit pas être négligé et peut être réduit grâce à une hygiène corporelle méticuleuse et au port de gants.

La vaccination est impossible contre les helminthiases et contre la plupart des maladies diarrhéiques. En revanche, on peut envisager la vaccination contre la typhoïde et l'administration d'immunoglobulines contre l'hépatite A dans le cas de groupes fortement exposés.

Une protection complémentaire peut être apportée par un soutien médical en vue du traitement des maladies diarrhéiques et par une chimiothérapie régulière. Cette dernière peut être axée sur les nématodoses intenses de l'enfant et sur l'anémie. Pour être efficace, la chimiothérapie doit être régulièrement recommencée. La fréquence des traitements nécessaires pour maintenir le degré d'infestation à un faible niveau (par exemple aussi faible que dans le reste de la population) dépend de l'intensité de la transmission mais, en principe, une fois par an suffit. Les médicaments en cause reviennent normalement à environ 0,50 dollars E.-U. par cure. Une à trois doses sont nécessaires selon le médicament utilisé.

Sauf exception, la chimiothérapie et la vaccination sont insuffisantes pour protéger les ouvriers agricoles exposés à des eaux résiduaires ou à des excréta bruts, ou leurs familles. Cependant, quand ce per-

sonnel travaille dans une structure organisée, par exemple des exploitations appartenant à l'Etat ou à une société commerciale, ces mesures peuvent constituer un palliatif utile dans l'attente d'une amélioration de la qualité des déchets utilisés.

S'agissant des consommateurs, on peut atténuer le risque en faisant cuire suffisamment longtemps les légumes et la viande, en faisant bouillir le lait et en maintenant un niveau élevé l'hygiène corporelle et l'hygiène dans les cuisines. L'hygiène alimentaire doit être enseignée dans le cadre des campagnes d'éducation pour la santé mais, souvent, ces campagnes n'ont que bien peu d'efficacité dans les sociétés à niveau d'instruction limité ou en dehors du cadre institutionnel.

L'inspection de la viande permet de limiter le risque de téniasse à condition que l'abattage ait lieu uniquement dans des établissements agréés où l'on peut inspecter toutes les carcasses et rejeter celles qui sont contaminées. Bien qu'on connaisse des cas où des œufs de ténia ont survécu plusieurs mois sur le sol de pâturages, le risque de cysticercose bovine peut être réduit par interruption de l'épandage de déchets deux semaines au moins avant que le bétail ne soit mis au pré.

L'irrigation des arbres fruitiers au moyen d'eaux résiduaires doit également être interrompue deux semaines avant la cueillette.

Les habitants du lieu doivent être informés de l'emplacement de tous les champs où l'on utilise des déchets d'origine humaine, de façon qu'ils puissent éviter d'y pénétrer et empêcher leurs enfants d'en faire de même. Des panneaux de mise en garde doivent être installés en bordure de ces champs, spécialement s'ils ne sont pas entourés d'une clôture.

Aucune observation épidémiologique n'indique que les personnes vivant à proximité de champs irrigués au moyen d'eaux résiduaires encourent un risque important du fait des agents pathogènes contenus dans les aérosols qui proviennent d'un asperseur en fonctionnement. Pourtant, des mesures doivent être prises pour éviter que des gouttelettes d'eau provenant de ces appareils ne viennent se déposer sur des personnes se trouvant à proximité. Ils doivent donc être situés à au moins 50-100 m en retrait des habitations ou des routes, cette distance assurant une marge raisonnable de sécurité. Souvent, cette distance minimale doit être augmentée pour d'autres raisons, par exemple pour réduire la gêne causée par les mauvaises odeurs.

### **7.5.2. Aquaculture**

Il existe quatre catégories de personnes qui encourent un risque potentiel du fait de l'utilisation d'excreta et d'eaux résiduaires en aquaculture:

- le personnel d'exploitation des bassins d'aquaculture;
- les manipulateurs des poissons et des macrophytes provenant de ces bassins;
- les consommateurs de ces poissons et macrophytes;
- les personnes qui vivent à proximité de bassins engraisés au moyen d'excreta ou d'eaux résiduaires.

De nombreuses personnes appartiennent à plusieurs de ces catégories simultanément de sorte qu'elles sont doublement exposées. Les personnels d'exploitation des bassins encourent un risque potentiel élevé, spécialement de parasitose.

Les meilleures armes contre la schistosomiase sont le traitement des sujets infestés et la destruction des gastéropodes (voir section 7.2.4). Quand c'est impossible, on peut réduire l'exposition aux schistosomes par le port de cuissardes ou de waders (selon la profondeur du bassin), mais ce mode de protection est rarement utilisé et il interdirait d'ailleurs la récolte du lotus par la méthode traditionnelle qui consiste à le déraciner avec les orteils. Quand toutes les autres méthodes ont échoué, une chimiothérapie régulière serait bénéfique dans les zones d'endémie.

La population locale doit être informée de l'existence de bassins où l'on utilise comme engrais des excreta ou des eaux résiduaires, de façon qu'on puisse empêcher les enfants d'aller y jouer ou nager. Des panneaux de mise en garde doivent être disposés auprès des bassins qui sont proches d'une route, spécialement s'ils ne sont pas entourés d'une clôture. Mais, lorsqu'il n'existe pas de source d'eau suffisante pour la consommation ou l'assainissement, il est à peu près certain que la population locale va continuer d'aller se baigner, déféquer, etc., dans les bassins. L'approvisionnement en eau et l'assainissement constituent donc des mesures importantes pour limiter l'exposition humaine.

Les personnes qui manipulent les produits de l'aquaculture sont beaucoup moins exposées et elles peuvent se protéger en portant des gants et en observant une hygiène corporelle rigoureuse.

Là où on a l'habitude de consommer les produits de l'aquaculture sans les faire cuire, les tentatives visant à modifier cette préférence traditionnelle ne sont pas toujours couronnées de succès, si bien que la meilleure façon de protéger les consommateurs consiste à soumettre les déchets à un traitement convenable avant leur épandage.

# 8

## Planification et exécution

### 8.1 Planification des ressources

#### 8.1.1 Réutilisation des déchets et développement national

La rareté des eaux superficielles et des eaux souterraines dans de nombreux pays a conduit, ou est en train de conduire, à l'adoption de plans nationaux qui visent à assurer une répartition, une utilisation et une protection rationnelles de toutes les ressources hydriques disponibles. L'objectif de ces plans est de faire en sorte que l'utilisation des ressources rares se fasse avec le maximum de rendement économique possible en pratique. Les déchets d'origine humaine relèvent de ces plans nationaux relatifs aux ressources hydriques puisqu'ils peuvent modifier la qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau et donc imposer des limites à son emploi. L'incorporation dans les plans nationaux relatifs aux ressources hydriques de protocoles organisant la réutilisation des déchets est importante, spécialement quand l'eau est rare, en vue de préserver la qualité de l'eau mais aussi de réduire au minimum les coûts du traitement, de sauvegarder la santé publique et de tirer des éléments nutritifs et des matières organiques contenues dans les déchets le meilleur parti possible pour l'agriculture et l'aquaculture.

Dès lors qu'on admet que la réutilisation des déchets d'origine humaine fait partie intégrante de la planification du développement des ressources hydriques, on peut établir un plan national pour la réutilisation des déchets. En principe, il s'agit à la fois d'améliorer les pratiques existantes à cet égard et de formuler de nouveaux projets et programmes de réutilisation. On trouvera dans le présent chapitre des indications sur la façon de procéder pour établir ce plan.

#### 8.1.2 Cadre institutionnel

Au niveau national, l'utilisation des eaux résiduaires et des excréta relève de plusieurs ministères ou organismes. En général, les principales responsabilités se répartissent entre les différents ministères à peu près comme il est indiqué ci-dessous, encore qu'il existe des dispositions différentes dans certains pays:

- **Ministère de l'agriculture et de la pêche:** planification générale des projets; gestion du domaine public; installation et exploitation de l'infrastructure en matière d'irrigation; vulgarisation agricole et aquicole, y compris la formation; réglementation de la commercialisation.
- **Ministère de la santé:** protection de la santé, notamment fixation de normes de qualité, de méthodes de surveillance et de plannings pour l'utilisation des excréta et des eaux résiduaires traités; éducation pour la santé; surveillance et traitement des maladies.
- **Ministère des ressources hydriques:** intégration de l'utilisation des eaux résiduaires dans la planification et la gestion des ressources hydriques.
- **Ministère des travaux publics/administration locale:** collecte et traitement des excréta et des eaux résiduaires.
- **Ministère des finances et de la planification économique:** évaluation économique et financière des projets; réglementation des importations (matériel, engrais).

D'autres ministères et services officiels peuvent également être concernés, par exemple ceux qui ont à s'occuper de la protection de l'environnement, du régime foncier, du développement rural, des coopératives et des problèmes de la femme. Malheureusement, le ministère de la santé n'intervient souvent dans ce secteur que de façon marginale tout au plus, même lorsque les déchets font l'objet d'une utilisation massive. Chaque fois qu'on s'efforce de limiter les risques que cette pratique fait peser sur la santé, la participation active du ministère de la santé est le garant d'une meilleure efficacité. Lorsqu'on met en œuvre un nouveau projet ou une mesure de protection sanitaire qui implique des modifications dans la pratique agricole, le ministère de l'agriculture a un rôle essentiel à jouer.

Une coopération harmonieuse est indispensable entre les divers organismes concernés, particulièrement entre leur personnel technique. Certains pays, spécialement ceux qui n'ont que peu de ressources naturelles en eau, peuvent avoir intérêt à créer un organe exécutif, par exemple un comité permanent technique inter-service placé sous la tutelle d'un ministère (agriculture ou ressources hydriques) ou, éventuellement, un organisme para-étatique distinct (associant à la fois des sociétés privées et des fonds publics), par exemple un office de recyclage des eaux résiduaires (comme en Californie, voir encadré 8.1)

### Encadré 8.1 Gestion de l'utilisation des eaux résiduaires aux Etats-Unis d'Amérique

Aux Etats-Unis d'Amérique, il n'existe pas d'organisme fédéral unique qui soit chargé de l'utilisation des eaux résiduaires ; le soin en est confié à plusieurs organismes qui ont des responsabilités dans ce secteur. Le gouvernement fédéral a défini des normes obligatoires concernant la qualité des effluents rejetés et il subventionne les projets d'utilisation des eaux résiduaires. A cet égard, c'est l'Agence de Protection de l'Environnement (Environmental Protection Agency) qui a le plus d'influence sur la mise en valeur des eaux résiduaires puisque sa mission essentielle est d'assurer le respect des dispositions des lois fédérales sur la limitation de la pollution des eaux et des autres textes fédéraux annexes. D'autres organismes fédéraux, par exemple le Bureau de la Mise en Valeur (Bureau of Reclamation), ont été appelés à participer à l'exploitation des eaux résiduaires en vue de compléter les ressources hydriques existantes.

Au niveau des Etats, la politique générale adoptée et la nature des organismes en cause sont variées, principalement par suite d'opinions différentes quant à l'intérêt de l'utilisation d'eaux résiduaires dans le cadre des ressources globales. Le meilleur exemple d'un programme global au niveau d'un Etat est peut être celui qu'a élaboré la Californie, où l'utilisation des eaux résiduaires fait partie intégrante de la planification des ressources hydriques. En 1977, le Conseil de réglementation des ressources hydriques de l'Etat a adopté une politique et un plan d'action pour la mise en valeur des eaux en Californie, qui prévoit le financement des projets qui tirent avantageusement parti des eaux résiduaires. Le plan comporte aussi des recommandations sur la mise en œuvre des projets. En outre, le Gouverneur a créé à l'intérieur du Conseil de l'Etat, un Bureau de recyclage des eaux chargé de promouvoir l'utilisation des eaux résiduaires en Californie. Le Bureau comprend deux comités, l'un chargé de la coordination interorganismes, l'autre réunissant, à titre consultatif, des représentants des usagers et des techniciens spécialistes. Les Conseils régionaux pour la qualité de l'eau dans l'Etat sont chargés de la coordination au niveau local, notamment de l'étude des demandes de permis d'utilisation d'eaux résiduaires et de la mise en application des limitations éventuellement imposées à l'utilisation de ces eaux.

Source : Fordham (1984).

à qui sera confié le développement, la planification et la gestion dans ce secteur. Une autre solution possible (adoptée en Tunisie, voir encadré 8.2) consiste à inclure la promotion du recyclage des déchets parmi les objectifs de la Décennie internationale de l'eau de boisson et de l'assainissement, sous l'égide d'un Comité interministériel chargé de la coordination des activités de la décennie au niveau national. Des pouvoirs juridiques doivent être attribués à cette fin.

Cependant, la plupart des pays jugeront sans doute inutiles de telles dispositions officielles et, bien souvent, un simple comité *ad hoc* suffit. On peut aussi attribuer la responsabilité de ce secteur, en tout ou partie, à des organismes existants : c'est ainsi qu'un conseil natio-

## Encadré 8.2 Gestion de l'utilisation des eaux résiduaires en Tunisie

La loi sur l'eau, promulguée en 1975, stipule que la planification des ressources hydriques doit s'inspirer de la volonté de tirer le maximum de profit possible de chaque mètre cube d'eau. Ce principe vaut pour l'utilisation de toutes les eaux résiduaires traitées dont la Commission nationale de l'assainissement a fait l'un de ses objectifs dans le cadre de la Décennie internationale de l'eau et de l'assainissement.

Les études initiales sont effectuées par l'Office national de l'Assainissement (ONAS) qui a récemment examiné les plans de 20 nouveaux projets. Bon nombre de ces projets se situent sur des terres domaniales données à bail à des exploitants individuels. La construction des ouvrages nécessaires pour le transport et la répartition des eaux résiduaires traitées depuis la station d'épuration jusqu'à la zone irriguée est assurée par la Direction des travaux hydrauliques, au sein du Ministère de l'agriculture.

Le système est ensuite géré par les autorités locales chargées du développement agricole, également sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture, qui prélève une taxe pour l'eau distribuée et sont habilitées à imposer une amende aux agriculteurs ou à cesser de les fournir lorsqu'ils contreviennent aux règlements qui limitent les cultures dont l'irrigation est autorisée au moyen d'eaux résiduaires.

Ailleurs, le Ministère de l'Agriculture peut autoriser des sociétés privées à assurer la gestion de projets d'irrigation au moyen d'eaux résiduaires: c'est ainsi qu'un complexe hôtelier a été autorisé à se servir de ses propres eaux résiduaires traitées. Le permis correspondant précise que l'autorisation n'est accordée que pour les pelouses (y compris un terrain de golf), les plantes ornementales et les arbres autres que les arbres fruitiers et comporte un cahier des charges où sont précisés les droits et les obligations de la direction du complexe, du Ministère de l'Agriculture, de l'ONAS et du Ministère de la Santé publique.

Le Ministère de la Santé publique est responsable de la qualité hygiénique des eaux résiduaires utilisées pour l'irrigation et des cultures vendues sur le marché. En outre, il est chargé de surveiller l'attribution des eaux et de faire appliquer la réglementation anti-pollution et il joue un rôle important dans l'élaboration des règlements relatifs à l'utilisation des eaux résiduaires.

Source: Strauss (1986b).

nal de l'irrigation peut être chargé de l'utilisation des eaux résiduaires en agriculture tandis que le conseil national de la pêche sera chargé de l'utilisation des excréta et des eaux résiduaires en aquaculture. Il faut alors réunir un comité de représentants des divers organismes qui ont des responsabilités dans le secteur.

La constitution d'un organisme inter-institutions ou interministériel implique un compromis entre des représentants qui sont ou bien trop occupés pour se réunir lorsqu'il s'agit de hauts fonctionnaires, ou bien incapables de prendre des décisions ou de veiller à leur application lorsqu'il s'agit de fonctionnaires subalternes. Le problème qui

risque le plus de se poser à terme est le manque de régularité des réunions du comité. Il faut donc que son mandat stipule une fréquence minimale des réunions, cette disposition ayant le maximum de chances d'être respectée si une seule personne ou un seul département est chargé de convoquer régulièrement les réunions et de suivre les décisions.

Dans les pays où il existe une administration régionale ou fédérale, de telles dispositions en vue de la collaboration entre services sont encore plus importantes au niveau régional ou au niveau de l'Etat. Si l'on peut définir au niveau national les grandes lignes de la politique et les principales normes en matière d'utilisation des déchets, c'est à l'organisme régional qu'il revient de les interpréter ou de les compléter compte tenu de la situation locale. Un exemple à cet égard est fourni par les rapports qui se sont instaurés entre certains organismes fédéraux et certains organismes d'Etat aux Etats-Unis d'Amérique (voir encadré 8.1).

S'agissant des mesures de protection de la santé, les principales fonctions d'un organisme interministériel sont en principe les suivantes :

- élaborer une politique cohérente aux niveaux régional ou national et en suivre la mise en œuvre;
- fixer la répartition des fonctions entre les divers ministères et autres organismes intervenant dans le secteur et préciser la nature de leurs liens;
- évaluer les propositions concernant de nouveaux systèmes de réutilisation de grande ampleur sous l'angle de la santé publique et de la protection de l'environnement;
- superviser la promotion et la mise en vigueur d'une législation nationale et de codes de pratique;
- élaborer une politique cohérente de développement des personnels à l'intention du secteur.

Le cadre institutionnel au niveau d'un projet est examiné à la section 8.3.4.

## 8.2 Amélioration des pratiques existantes

Les déchets humains sont d'ores et déjà utilisés en agriculture et en pisciculture dans de nombreux pays, souvent de façon illégale et sans reconnaissance officielle de la part des autorités sanitaires. Quand cette pratique est traditionnelle ou qu'elle a pris naissance spontanément, il est courant qu'on utilise des déchets non traités ou insuffisamment traités. Les observations faites dans de nombreux pays montrent qu'une simple interdiction n'a pas grande influence sur la fréquence de cette pratique ni sur les dangers qui en résultent pour la santé publique. Bien au contraire, l'interdiction, loin de limiter cette pratique, risque de rendre plus difficile la surveillance et la réglementation et, en outre, de compliquer la surveillance des maladies et les soins aux personnes les plus exposées au risque d'infection. Une méthode dont il y a davantage à attendre consiste à accorder un soutien en vue d'améliorer les pratiques en vigueur, non seulement afin de réduire au minimum les dangers pour la santé mais aussi d'accroître la productivité.

Parallèlement, il faut prendre en général certaines mesures juridiques. Toutefois, il est plus facile d'édicter un règlement que de le faire appliquer. Lorsqu'on élabore une nouvelle réglementation (ou qu'on décide de faire appliquer la réglementation en vigueur), il importe de prévoir les institutions, le personnel et les ressources nécessaires au contrôle de son application. Un point peut-être encore plus important est de veiller à ce que la réglementation soit réaliste et applicable dans le cadre prévu. Souvent, on a intérêt à adopter une démarche progressive ou à expérimenter une nouvelle série de dispositions en persuadant une administration locale de les adopter sous forme d'arrêtés avant de les généraliser à l'ensemble du pays.

Les mesures destinées à protéger la santé publique sont particulièrement difficiles à mettre en œuvre quand il existe un grand nombre de sources ou de propriétaires individuels de déchets: effluents de fosses septiques, gadoues ou eaux pompées en vertu de la riveraineté dans une rivière très polluée où les effluents ne sont que légèrement dilués. Lorsqu'on peut assurer une réglementation uniforme de l'utilisation des déchets en installant un réseau d'égouts ou en créant une station centrale de traitement des gadoues ou encore en dirigeant les effluents sur une installation d'épuration au lieu de les déverser dans un cours d'eau, l'organisme central exerce une influence beaucoup plus grande sur la façon dont les déchets sont utilisés ultérieurement et il est donc mieux à même de réduire au minimum les risques pour la santé. Comme le montrent ces exemples, les mesures nécessaires pour y parvenir équivalent souvent, en pratique, à la création d'un nouveau système. Cet aspect fait l'objet de la section 8.3.

## 8.2.1 Enquêtes

La première chose à faire, chaque fois qu'on essaie d'améliorer les pratiques existantes, consiste à déterminer la nature de ces pratiques et à en déterminer l'importance. Souvent, ces pratiques sont illicites ou censées l'être, de sorte qu'elles n'ont pas grande chance d'être mentionnées dans les documents officiels. De plus, les agriculteurs hésitent parfois à déclarer aux fonctionnaires qu'ils utilisent des excreta ou des eaux résiduaires, de peur d'être poursuivis ou, éventuellement, d'avoir à payer une taxe. Rien ne saurait donc remplacer une enquête attentive sur le terrain, accompagnée de conversations officieuses menées avec tact avec les agriculteurs et les fonctionnaires locaux. Les organismes locaux concernés, par exemple les associations d'agriculteurs, les organismes de commercialisation et les organisations communautaires non gouvernementales, sont parfois mieux informés que les fonctionnaires.

Une visite sur les lieux de tous les exutoires d'eaux résiduaires et, pour chacun d'eux, d'un court tronçon en aval, révèle souvent des surprises, de même qu'une inspection des emplacements où sont déversées les gadoues. En général, le personnel qui travaille dans ces décharges et dans les stations d'épuration des effluents sait fort bien si l'on utilise ou non des déchets dans la région, pour l'agriculture ou l'aquaculture. Il en va de même des inspecteurs des services de santé mais il faut parfois les rassurer en leur indiquant que leur compétence, leur diligence ou leur intégrité ne seront pas mises en doute même s'ils sont incapables de faire respecter la réglementation.

Les eaux résiduaires sont souvent utilisées en dehors de tout système officiel après leur rejet ou leur dilution dans un cours d'eau naturel. Les risques qui en découlent pour la santé sont parfois presque aussi importants que si l'on utilisait les eaux résiduaires non diluées, spécialement lorsque le débit naturel du cours d'eau est, à la saison sèche, à peine supérieur au débit des effluents, (au moment, précisément où l'eau a le plus de chances d'être utilisée). Dans certains cas, il faut aussi tenir compte de systèmes d'évacuation des excreta fonctionnant sur place. C'est ainsi qu'on peut utiliser le surnageant de fosses septiques pour irriguer les jardins et les potagers dans les agglomérations urbaines ou utiliser comme engrais le contenu de latrines à fosse dans les champs ou les bassins de pisciculture voisins, en dehors de tout système officiel.

A ce stade, l'enquête doit rester aussi ouverte que possible et dénuée de caractère officiel. Par la suite, lorsque les principales questions sont claires et qu'on a besoin d'obtenir des données chiffrées, on peut recourir à un interrogatoire structuré des agriculteurs (voir Simpson-Hebert, 1983).

### Encadré 8.3 Evaluation des risques pour la santé par voie d'enquêtes épidémiologiques

Une enquête épidémiologique auprès des travailleurs agricoles a normalement pour objectif de déterminer l'importance des maladies qui résultent de l'utilisation de déchets d'origine humaine. On peut, pour cela, comparer l'importance de telle ou telle maladie au sein de la population « exposée » (celle qui utilise ces déchets) et d'une population « non exposée » ou population témoin (chez qui cette pratique est inexistante). La différence constatée peut ensuite être attribuée à l'utilisation des déchets, sous réserve que les deux populations comparées soient semblables à tous autres égards, notamment l'appartenance ethnique et la situation socio-économique.

Mieux vaut limiter l'étude aux maladies associées aux excréta qui ont le plus d'importance localement chez les travailleurs de l'agriculture. Il s'agit en général des helminthiases intestinales et des maladies diarrhéiques ainsi que, dans certaines régions, de la typhoïde et de l'hépatite A. Quand on pratique l'aquaculture, certaines helminthiases peuvent prendre de l'importance, par exemple la distomatose d'Extrême-Orient et la schistosomiase.

Le choix des infections à étudier et la méthode d'étude doivent par ailleurs être orientés par des considérations pratiques. Dans une enquête transversale effectuée une fois pour toutes, la taille de l'échantillon nécessaire dépend de la prévalence de l'infection et de la différence de prévalence que l'on cherche à mettre en évidence entre les deux groupes. De façon générale, il faut un échantillon de taille importante lorsque la prévalence de l'infection est faible. Par conséquent, l'étude de la prévalence des maladies diarrhéiques chez les travailleurs agricoles exige, en principe, un échantillon plus important que l'étude des helminthiases intestinales (par exemple ascaridiase, trichocéphalose et ankylostomiase). Les deux exemples ci-dessous donnent une idée de l'importance de l'échantillon nécessaire pour avoir 90% de chances de mettre en évidence une différence au niveau de signification statistique de 5% :

- Un échantillon d'environ 230 personnes par groupe est en principe nécessaire lorsque la prévalence de l'ascaridiase dans la population générale (non exposée) est de 30% et atteint 45% dans la population exposée.
- Il faut environ 1 720 personnes dans chaque groupe quand les maladies diarrhéiques ont une prévalence de 5% dans la population générale (non exposée) et de 7,5% dans la population exposée.

Les maladies diarrhéiques sont répandues mais elles ont une faible prévalence instantanée du fait de la courte durée de chaque épisode. Dans ce cas, l'effectif de l'échantillon peut être réduit à condition qu'on effectue une étude prospective de cohorte pour suivre l'incidence de la maladie pendant un certain temps. Mais cette méthode soulève des problèmes d'organisation beaucoup plus délicats.

Pour calculer la taille des échantillons, on se reportera à un manuel de statistique approprié (par exemple Fleiss, 1981 ; Lwanga & Lemeshow, 1989) et l'on consultera les recommandations de l'OMS (voir par exemple, Organisation mondiale de la Santé, 1981b).

*(Encadré 8.3 suite)*

Une enquête épidémiologique est une entreprise complexe qui doit être confiée à des fonctionnaires qualifiés du ministère de la santé. Elle doit s'effectuer sous la direction d'un épidémiologiste, et un statisticien doit intervenir dès les premiers stades pour aider à la conception de l'enquête ainsi qu'à l'analyse des données. En principe, l'étude comporte quatre phases successives :

1. travaux préparatoires, à savoir conception de l'étude, identification de l'échantillon de population et mise au point d'un questionnaire ;
2. Etude pilote en vue d'apprécier la faisabilité et l'adéquation de l'étude, de former le personnel de terrain et d'affiner le questionnaire ;
3. Travail proprement dit sur le terrain ;
4. Analyse des données.

Des recommandations ont été formulées au sujet de la conduite et de l'interprétation des études d'éco-épidémiologie par l'OMS (1986). Bien que ces recommandations concernent principalement les études sur les effets des produits chimiques et les maladies chroniques, elles sont parfaitement valables pour des études consacrées à l'influence de la réutilisation des déchets sur les maladies infectieuses.

Source : U. Blumenthal, communication personnelle.

Les résultats de l'enquête sont parfois surprenants et même consternants, de sorte qu'on peut être tenté d'imposer une interdiction générale, spécialement quand il existe déjà une réglementation dans ce domaine. Mais pareille décision risque d'être inefficace et même d'aller à l'encontre de son objectif : mieux vaut l'éviter tant que les autres solutions décrites ci-après n'ont pas été soigneusement envisagées. De plus, il est souhaitable d'apprécier les risques pour la santé qui découlent de toute pratique de recyclage des déchets compte tenu des modalités générales de l'hygiène et de la transmission des maladies dans la région. Par exemple, il arrive qu'on trouve des coliformes fécaux ou des œufs d'ascaris sur des légumes fertilisés au moyen d'eaux résiduaires, mais il faut comparer cette contamination avec celle des mêmes produits, cultivés par d'autres méthodes, dans des points de vente locaux, par exemple sur les marchés. Une enquête épidémiologique auprès des travailleurs agricoles peut aussi fournir une vue plus nuancée des dangers pour la santé (voir encadré 8.3). Lorsque les ouvriers agricoles consomment une partie de leur propre production, ils constituent (de même que leur famille) le groupe le plus exposé au risque d'infection.

Une enquête officieuse sur les pratiques en matière de réutilisation de déchets ne doit pas avoir pour seul objectif de découvrir à quel endroit des déchets sont utilisés; il faut en outre qu'elle apporte une réponse aux questions suivantes:

- De quelle façon les déchets sont-ils ramassés, traités et entreposés?
- Quel est le volume utilisé?
- De quelle quantité dispose-t-on?
- Sur quelles cultures ces déchets sont-ils répandus?
- Quels sont les avantages de cette pratique?
- De quelle façon et à quelle époque les déchets sont-ils utilisés?

Les réponses à la dernière question peuvent suggérer des interventions. Certains aspects de la pratique en usage contribuent parfois à réduire déjà les risques pour la santé — par exemple l'usage d'enterer les gadoues avant la plantation — et servir ainsi de point de départ à de nouvelles améliorations.

Il est également utile d'étudier le cadre organisationnel. Les agriculteurs peuvent être des propriétaires exploitants, des employés, des fermiers, des métayers ou des squatters. Selon le cas, ils sont libres ou non, en pratique, de choisir la nature de leurs productions ou de leurs méthodes agricoles (ou aquicoles) du fait de leur statut ou des contraintes du marché. Pour pouvoir réduire les risques pour la santé, il faut arriver à persuader, inciter ou obliger quelqu'un à changer sa pratique actuelle, mais ce «quelqu'un» n'est pas forcément celui qui travaille aux champs.

### 8.2.2 Réglementation en vigueur

Si l'on estime que l'utilisation de déchets d'origine humaine en agriculture ou en aquaculture constitue une menace pour la santé, il est bon d'étudier les textes législatifs et réglementaires en vigueur à ce sujet avant de se pencher sur les divers moyens de réduire les risques au minimum. Il s'agit, le cas échéant, de la Loi sur l'eau et de la législation concernant la pollution de l'environnement, la qualité de l'eau, l'hygiène alimentaire et la médecine du travail.

Bien souvent, on constate que cette législation est régulièrement violée, spécialement quand il existe pour cela des raisons économiques

puissantes. Cela arrive, par exemple, à proximité des grandes villes des régions arides où les eaux résiduaires urbaines représentent parfois une ressource inestimable, non pas tellement parce qu'elles contiennent des déchets mais bien parce que c'est pratiquement la seule source d'eau disponible. Dans ces régions, on connaît des exemples où les agriculteurs ont éventré les égouts pour détourner les eaux résiduaires brutes en direction de leurs champs. Dans les régions à forte densité démographique, la production agricole, et parfois la production piscicole, est souvent si intensive qu'il faut tirer de chaque hectare le maximum de rendement possible. Dans ces conditions, les excreta acquièrent une très grande valeur du fait de leur richesse en éléments nutritifs. Dans certaines régions d'Asie, par exemple, on connaît des cas où le contenu des latrines est volé pendant la nuit afin d'être utilisé en agriculture.

Quand les déchets d'origine humaine prennent de la valeur, soit à cause de l'eau qui en assure le transport, soit à cause de leur concentration en nutriments, les agriculteurs cherchent à tirer le maximum de profit de cette ressource précieuse, en choisissant la culture la plus rentable. Quand il s'agit de paysans pauvres ou qui n'ont qu'un droit précaire à l'exploitation de leurs terres, un élément de choix complémentaire peut être la nécessité de récupérer rapidement l'argent investi. Un squatter, par exemple, n'a généralement pas le temps d'attendre que les fruits mûrissent sur les arbres, de peur d'être évincé et de voir son champ livré au bulldozer en vue d'une nouvelle construction. Dans ces conditions, il choisira souvent une culture maraîchère et, parfois, des légumes qui sont consommés crus.

Quand la réutilisation des déchets se fait selon une méthode en contradiction avec les règlements en vigueur, il importe d'en rechercher les raisons. S'il est impossible d'éliminer les diverses causes (examinées ci-dessous) de non-respect de la réglementation, il n'y a pas grand chose à attendre de l'adoption d'une nouvelle législation.

## **Normes inappropriées**

La population dans son ensemble peut, à tort ou à raison, estimer qu'il n'existe aucun risque appréciable pour la santé ou que l'adoption d'une réglementation ne contribuerait guère à réduire ce risque. Il arrive également qu'on ne connaisse pas de méthode susceptible de diminuer les risques pour la santé sans porter gravement atteinte aux revenus des agriculteurs. En fait, s'il n'existe aucun risque pour la santé, toute réglementation est dénuée d'intérêt. Si, à l'inverse, le risque est réel, il faut en priorité fournir des motivations au personnel chargé de faire appliquer le règlement en l'informant de ces risques et en lui ensei-

gnant des méthodes peu coûteuses de nature à les réduire au minimum.

Bien souvent, la réglementation, par exemple les normes de qualité imposées aux eaux résiduaires, est empruntée à d'autres pays sans souci d'adaptation aux conditions locales. Dans d'autres cas, l'adoption de la réglementation a des raisons diverses, qui n'ont rien à voir avec la preuve épidémiologique de sa nécessité. C'est ainsi qu'aux Etats-Unis d'Amérique, le seul Etat qui ait fixé une norme de qualité virale en vue de la réutilisation des eaux résiduaires, possède une université où l'on a mis au point des techniques pour l'examen virologique des eaux résiduaires.

L'introduction ou l'adoption inconsidérées d'une réglementation trop rigoureuse ne peut avoir que deux conséquences. Ou bien le règlement sera tourné ou négligé de sorte que les risques pour la santé resteront les mêmes qu'auparavant ou bien il provoquera une crainte intempestive de poursuites judiciaires ou de maladies, de sorte qu'on hésitera désormais à utiliser des déchets d'origine humaine, d'où un gaspillage de ressources. On peut cependant établir, sur la base des critères recommandés à Engelberg (voir tableaux 1.4 et 1.6), une série de normes plus réalistes qui protègent la santé publique.

### **Ignorance de la législation en vigueur**

La meilleure solution consiste alors à éduquer et à former le personnel chargé de faire appliquer la loi.

### **Manque de ressources**

C'est généralement aux inspecteurs sanitaires qu'il revient de veiller à ce que l'utilisation de déchets en agriculture ou en pisciculture se fasse, lorsqu'elle est autorisée, de façon hygiénique et conformément aux dispositions de la loi. Dans certains cas, le ministère de l'agriculture ou l'organisme responsable de la gestion des systèmes d'irrigation par eaux résiduaires sont compétents pour réglementer les pratiques agricoles, par exemple en imposant la limitation de ce type d'irrigation à certaines cultures. Quelles que soient les modalités, l'organisme compétent doit s'en remettre au personnel de terrain pour faire respecter la réglementation dans son secteur. Mais ce personnel de terrain risque fort d'avoir de nombreuses autres tâches dont l'urgence lui fait négliger celle-ci; il arrive aussi qu'il n'ait pas les moyens de transport nécessaires pour effectuer des tournées régulières dans la région concernée.

Une solution qui paraît judicieuse serait de cumuler le rôle de fonctionnaire chargé de faire appliquer la réglementation et celui d'agent

de vulgarisation agricole ou de responsable d'un système d'irrigation. Cette solution garantit la présence régulière de personnel dans la région en cause et elle modifie l'attitude des agriculteurs qui voient dans l'intéressé davantage un collègue qu'un adversaire. Cependant, un personnel plus nombreux est parfois nécessaire pour faire disparaître tout risque pour la santé.

### **Absence de définition précise des responsabilités**

Mais, bien souvent, le problème tient moins à la pénurie de personnel de terrain qu'au fait qu'on a négligé de définir de façon précise à qui revient le soin de faire appliquer la réglementation, la priorité à accorder à cette tâche dans les descriptions de poste et la façon dont ce personnel doit être encadré et doit avoir à rendre compte de l'exécution de cette fonction.

### **Pressions extérieures**

Il est courant que les citoyens locaux qui sont des notables et possèdent parfois beaucoup de terres qu'ils consacrent à l'agriculture ou à la pisciculture, aient tendance à abuser de leur influence pour se soustraire aux rigueurs de la loi. Après quelques cas de ce type, les fonctionnaires chargés de faire respecter la réglementation, par exemple les inspecteurs sanitaires, risquent d'y renoncer, trouvant trop dangereux pour eux-mêmes de poursuivre des personnages aussi puissants. Le problème se pose d'autant plus que les dépenses à engager pour se mettre en accord avec la réglementation sont relativement élevées. Si l'on veut que la réglementation soit mieux respectée, on peut la rendre moins rigoureuse ou ne chercher activement à faire respecter que les mesures relativement peu exigeantes. Une autre méthode utilisable lorsqu'il est impossible d'assouplir les règles sans entraîner un risque inacceptable sur le plan sanitaire, consiste à placer les fonctionnaires chargés de faire appliquer la loi sous le contrôle étroit de supérieurs hiérarchiques. Un haut fonctionnaire de l'administration nationale risque moins d'être corrompu ou intimidé qu'un auxiliaire de santé local employé par la municipalité.

## **8.2.3 Les différentes solutions**

Les diverses solutions techniques possibles pour éviter que l'utilisation de déchets n'entraîne des risques pour la santé ont été exposées à la section 7. En pratique, lorsqu'on utilise déjà des excreta ou des eaux résiduaires, ces solutions ne sont pas toutes possibles ni appro-

priées, et le choix de l'association de mesures qui convient le mieux dépend des circonstances locales.

Il est judicieux de se contenter au départ, même si elles sont modestes, de quelques mesures possibles en pratique compte tenu des ressources disponibles de façon à améliorer progressivement la situation. Ces mesures peuvent être mises en œuvre successivement ou expérimentées dans une région avant d'être progressivement généralisées de façon à s'étendre à toutes les exploitations concernées. Quelle que soit la couverture ou la durée de l'opération, il faut suivre la mise en œuvre de ces mesures pour s'assurer qu'elles ne sont pas irréalistes et pouvoir corriger les erreurs éventuelles.

Les sections qui suivent sont consacrées, pour chaque solution technique connue, à l'examen de facteurs d'ordre gestionnaire qui ont des répercussions en matière de faisabilité, de planification et d'exécution. Le plan suivi reprend celui de la section 7, à savoir: traitement, limitation à certaines cultures, épandage et limitation de l'exposition humaine.

## Traitement

**Eaux résiduaires.** Le traitement est une option qui ne pose guère de problèmes techniques quand les eaux résiduaires recueillies dans un réseau d'égouts sont destinées à l'irrigation. L'inconvénient de cette formule est qu'elle exige en général des investissements importants pour les installations, encore qu'il soit parfois peu coûteux et efficace de développer ou d'améliorer le fonctionnement de stations d'épuration des eaux résiduaires déjà en place (voir section 7.2.5).

La construction d'une station de traitement sur le terrain disponible le mieux adapté conduit souvent à changer le point de décharge des eaux résiduaires. Cette modification est avantageuse pour les propriétaires ou locataires de terrains situés à proximité du nouveau site, mais elle peut se faire au détriment des autres. Il est nécessaire de leur accorder certains avantages pour s'assurer leur coopération; on connaît des exemples où des exploitants lésés ont brisé les canalisations d'égouts en amont d'une nouvelle station de traitement pour pouvoir continuer à avoir accès aux effluents bruts.

Le terrain où l'on utilise des eaux résiduaires non traitées en agriculture est fréquemment celui qui convient le mieux pour la construction de la station de traitement, mais si ce terrain est situé à la périphérie d'une grande ville, il sera également très recherché comme terrain constructible. A vrai dire, il peut avoir déjà été acheté par des spéculateurs. S'il appartient encore à ceux qui l'exploitent, un argument puissant pour les inciter à le vendre à un prix raisonnable peut

consister à leur offrir des droits sur le sol et sur l'eau en aval de la nouvelle installation afin qu'ils puissent continuer d'utiliser les effluents traités.

Lorsque des eaux résiduaires sont utilisées en dehors de toute réglementation, elles proviennent souvent de cours d'eau qui sont pollués au point de constituer des effluents pratiquement bruts, mais légèrement dilués. Il est parfois plus facile de recouvrir le cours d'eau pour en faire un égout et de traiter la totalité des eaux qui y sont acheminées que de recueillir et de traiter à part le contenu des nombreux petits exutoires qui l'alimentent. Lorsqu'on décide d'introduire ou d'améliorer le traitement des eaux résiduaires rejetées dans un cours d'eau de ce type, il faut envisager la mise en place d'un réseau d'irrigation adapté à ce type d'utilisation. De la sorte, la réglementation et l'utilisation des eaux résiduaires dépendent d'un seul et même organisme, ce qui simplifie beaucoup l'application d'autres mesures de protection sanitaire, comme on le verra dans les paragraphes suivants. La planification et la mise en œuvre d'un tel système sont étudiées plus à fond à la section 8.3.

Le traitement est une solution beaucoup plus difficile à mettre en œuvre quand les eaux résiduaires utilisées sont d'origines diverses, par exemple des fosses septiques qui débordent. On peut envisager des poursuites à l'encontre des producteurs d'eaux résiduaires pour les empêcher de polluer le milieu. Par exemple, les propriétaires de fosses septiques peuvent être contraints de construire des puits perdus conveables et d'éliminer les boues des fosses pour empêcher qu'elles ne colmatent les puits déjà en fonctionnement. Même dans ces conditions, il reste possible de tirer parti des eaux résiduaires, mais sans danger. L'irrigation du sous-sol assurée par les puits perdus peut permettre une petite culture urbaine hygiénique mais rentable dans les jardins où ils sont situés.

Dans d'autres cas, la seule solution est parfois de construire une importante installation d'assainissement. Par exemple, quand il existe un grand nombre de fosses septiques qui débordent, ce peut être le signe qu'il y a pas suffisamment de place pour construire des puits perdus bien adaptés: un réseau d'égouts de petit diamètre (Otis & Mara, 1985) est alors nécessaire pour recueillir les effluents. Les effluents peuvent ensuite être traités dans une seule station d'épuration, ce qui simplifie beaucoup les aspects techniques et organisationnels du traitement et de la réutilisation ultérieure.

**Excreta.** De la même façon, le traitement des excreta est beaucoup plus facile à mettre en œuvre quand un unique organisme, par exem-

ple une municipalité, se charge de leur collecte et de leur traitement. Une surveillance attentive est parfois nécessaire pour que le traitement, qui prend parfois longtemps, soit conduit pendant toute la durée voulue. Faute de cette surveillance, il est tentant, en période de forte demande, de court-circuiter certaines phases du traitement et de permettre l'utilisation d'excreta incomplètement traités.

Quand les excréta employés proviennent de nombreuses sources de petites dimensions, il est relativement plus difficile d'assurer un traitement séparé au niveau de toutes ces sources. Dans certaines grandes villes d'Asie où les gadoues sont recueillies par de nombreux petits entrepreneurs qui les vendent aux agriculteurs de la périphérie, il serait possible qu'un organisme municipal se charge d'acheter les gadoues brutes puis de les revendre, après traitement. Etant donné que le compostage améliore l'efficacité des gadoues comme engrais, on pourrait les revendre à un prix légèrement plus élevé, la différence compensant une partie du coût du compostage.

Cependant, dans les zones rurales, les agriculteurs qui se servent d'excreta bruts depuis des années risquent d'être difficiles à convaincre qu'un traitement s'impose. Ils ont parfois du mal à croire qu'une pratique qui remonte aussi loin puisse mettre leur santé en danger. Il serait peut-être plus efficace, pour les en persuader, de leur montrer, sur des parcelles de démonstration, qu'on obtient des rendements plus élevés avec des excréta traités. C'est là une tâche qui relève de la vulgarisation agricole.

Pour que les vulgarisateurs aient des chances de se faire entendre, il faut évidemment que les excréta traités soient réellement plus actifs comme engrais et que leur utilisation ne soit pas trop rebutante. Les agriculteurs peuvent être dissuadés d'utiliser des excréta soumis à un compostage avec des déchets solides si la digestion n'est pas complète et que des débris de grande dimension subsistent dans le compost. Dans ce cas, il faut éliminer ces débris du compost pour pouvoir le vendre.

**Aquaculture.** En aquaculture traditionnelle où on utilise des eaux résiduaires ou des excréta, le traitement est sans doute la solution qui a le plus de chance de succès. Un mode de traitement possible en aquaculture consiste à utiliser un ensemble de bassins en série (ou un bassin à plusieurs compartiments, placés en série) et à s'abstenir de prélever la production du premier bassin. Il arrive que des bassins disposés de la sorte n'aient pas tous le même propriétaire, de sorte que, pour promouvoir cette solution, on est parfois obligé de les organiser en coopérative. Une autre méthode envisageable consiste à créer un bassin de dépuración non contaminé où on laisse les poissons séjourner plusieurs semaines avant de les capturer. Pour cela, on peut soit cons-

truire un nouveau bassin, soit isoler une partie d'un bassin existant.

Quelle que soit la méthode de protection sanitaire utilisée lorsqu'on utilise des excreta en agriculture, son application nécessite en principe un changement de comportement, et probablement une mise de fonds, de la part d'un grand nombre d'utilisateurs individuels, de sorte que, là encore, il faut sans doute prévoir une incitation complémentaire. Une incitation possible peut être la plus grande commodité et le caractère plus intime de toilettes installées à l'intérieur du logement et dont on peut traiter les déchets, par comparaison avec une latrine installée en surplomb au-dessus d'un bassin de pisciculture.

### **Limitation à certaines cultures**

Il est relativement simple de limiter l'emploi de déchets à certaines cultures lorsque les utilisateurs sont importants et peu nombreux, qu'il s'agisse d'entreprises privées, de coopératives, de fermes d'Etat ou de la municipalité elle-même. En revanche, il est beaucoup plus difficile d'y parvenir en présence d'un grand nombre de petits agriculteurs. Les plantes comestibles qui ont *a priori* le plus de chance d'être exclues, par exemple les salades, sont parmi celles qui sont le plus rentables. Elles peuvent disposer de bons débouchés dans l'agglomération urbaine voisine d'où proviennent les eaux résiduaires, sans compter que leur courte durée de végétation assure un rendement rapide des investissements consacrés à ce type de culture par rapport au cas, par exemple, de l'arboriculture.

En pareille circonstance, il n'est cependant pas impossible d'édicter certaines interdictions; elles ont le plus de chances d'être respectées quand les habitudes alimentaires locales limitent la demande de légumes non cuits et qu'il existe des cultures de remplacement rentables, par exemple des céréales, offrant des débouchés certains (voir encadré 8.4). Les cultures industrielles, par exemple celles du coton ou de la vigne pour la production vinicole, se prêtent particulièrement à ce type de limitation (voir encadré 8.5).

Dans certains pays, le système de planification agricole en place assure un contrôle rigoureux de toutes les cultures, avec inspection régulière des champs de tous les agriculteurs et prise de sanctions à l'encontre de ceux qui ne respectent pas le plan. Ces systèmes permettent d'assurer le respect, sans grand coût supplémentaire, des limitations imposées à l'usage des déchets.

Lorsque rien n'a été fait localement pour limiter quoi que ce soit, il faut expérimenter la méthode dans une zone témoin avant de la généraliser. Cet essai permet aussi d'avoir une première idée des ressources nécessaires pour imposer le respect des limitations décidées et de

### Encadré 8.4 Limitation de l'utilisation des déchets à certaines cultures dans le périmètre d'irrigation N° 03, au Mexique

Quand l'eau utilisée pour l'irrigation contient des effluents non traités, comme c'est le cas dans le périmètre 03, la réglementation nationale limite leur usage à la culture des plantes qui sont consommées après cuisson ou, dans le cas contraire, qui n'entrent pas en contact avec le sol, ainsi qu'aux plantes fourragères. Dans chaque périmètre d'irrigation, un comité local réunissant des représentants du Secrétariat à l'agriculture et aux ressources hydriques (SARH) et de groupes locaux élaborent des accords sur la disposition de l'eau, la limitation de cette forme d'irrigation à certaines cultures et l'assolement. Dans le périmètre 03, le comité comporte des représentants du secrétariat local à l'agriculture, des banques locales, les industries agricoles, des organismes de commercialisation, des exploitants agricoles et des employés de coopérative, ainsi que des membres du SARH.

Les cultures interdites avec ce mode d'irrigation sont celles de la laitue, du chou, de la carotte, du radis, de la betterave, du coriandre, de l'épinard et du persil. Les principales cultures pratiquées sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Culture	Superficie cultivée (ha)	Proportion de la superficie totale (%)	Besoins en eau (cm)	Bénéfice net par hectare (milliers de pesos)
Maïs	19 668	41,0	100	41,4
Luzerne	17 972	37,5	158	22,4
Orge	1 852	3,9	72	15,8
Avoine	1 706	3,6	72	4,0
Froment	458	1,0	113	11,6
Piment	999	2,1	108	154,9
Tomates vertes	587	1,2	141	192,5
Haricots	865	1,8	31	20,1
Fèves	301	0,6	88	18,3
Divers	3 574	7,3	97	58,6

Les cinq premières cultures indiquées dans le tableau ci-dessus sont des céréales ou des plantes fourragères qui représentent 87% de la superficie totale cultivée. La charge de faire respecter les limitations imposées est confiée au personnel du SARH en poste dans chaque subdivision du périmètre. Mais le non-respect des limitations imposées ne soulève guère de problèmes étant donné l'importance de la demande de maïs (l'aliment de base) et des plantes fourragères au Mexique et la faible place que tiennent les légumes consommés crus dans l'alimentation de la majorité de la population. Les exploitants sont autorisés à faire pousser des piments et des tomates vertes qui sont pourtant consommées crues car il s'agit de plantes qui poussent nettement au-dessus du sol et qui, par conséquent, ne sont généralement pas contaminées par les effluents utilisés pour l'irrigation en surface. Ces plantes font l'objet d'une demande très importante car elles tiennent une large place dans l'alimentation des Mexicains et qu'elles ont un bon rendement économique.

Source: U. Blumenthal, communication personnelle.

### **Encadré 8.5 Limitation de l'utilisation des déchets à certaines cultures à Ica (Pérou)**

La ville d'Ica est située sur la côte du Pérou, à environ 300 km au sud de Lima, et elle est entourée par le désert. Traditionnellement, c'était une région viticole mais le coton a commencé à concurrencer la vigne au début du siècle. Initialement, l'eau d'irrigation provenait des cours d'eau et des puits, mais aujourd'hui, on se sert aussi d'eaux résiduaires.

La plus grande partie des eaux usées d'Ica est traitée à Cachiche, dans quatre bassins de stabilisation. Mais ces bassins sont malencontreusement disposés en parallèle, de sorte que l'effluent de sortie est de qualité médiocre, avec environ  $10^5$  coliformes fécaux pour 100 ml. Cet effluent est utilisé pour l'irrigation de quelque 400 ha de terrain; sa qualité insuffisante a fait interdire la culture de tubercules et de légumes poussant à proximité du sol, ainsi que celle des légumes qui sont consommés crus. Les principales cultures pratiquées sont celles du coton, du maïs et de la vigne. En outre, on utilise les eaux usées de Tinguina (un faubourg d'Ica), après traitement dans un seul bassin de stabilisation. On assure ainsi l'irrigation d'une superficie supplémentaire de 130 ha, réservée essentiellement à des vergers et à des plantations de coton. Au voisinage de ces zones, on se sert des eaux souterraines pour irriguer les cultures maraîchères et les autres cultures pour lesquelles il est interdit d'utiliser les eaux usées.

Le bon fonctionnement des bassins, le succès de l'utilisation des effluents et le respect des limitations imposées peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs: une tradition de cultures non maraîchères dans la région, l'existence d'eaux souterraines qui permet à certains exploitants de pratiquer la culture maraîchère, et la coopération établie entre le service des eaux et des eaux usées, responsable de la gestion des bassins, et l'Inspection sanitaire, chargée de faire respecter la réglementation.

*Source:* U. Blumenthal, communication personnelle.

voir quelles sont les dispositions institutionnelles les mieux adaptées à cette fin. Il faut en particulier organiser la commercialisation des cultures autorisées, à un prix suffisamment élevé pour intéresser les agriculteurs. Quand l'investissement initial doit être plus important et que la campagne est plus longue, il peut également être indispensables d'aider les intéressés à accéder au crédit agricole.

Faire respecter la réglementation dans les champs n'est pas toujours aussi facile qu'il semble à première vue. S'il faut plusieurs mois à une récolte pour pousser, de sorte qu'elle peut être inspectée pendant toute cette durée, l'épandage des eaux résiduaires n'est parfois nécessaire que quelques jours par mois et peut être dissimulé, même à des inspecteurs vigilants. Quelques-unes des leçons tirées de l'expérience du système de limitation appliqué avec succès au Mexique sont résumées dans l'encadré 8.6.

Une autre méthode envisageable consisterait à surveiller la qualité microbiologique des produits vendus sur le marché: mais cette méthode

## Encadré 8.6 Mise en application des limitations imposées aux cultures

Certaines limitations sont imposées aux cultures depuis plusieurs dizaines d'années dans les zones où l'on utilise pour l'irrigation des eaux résiduaires provenant de la ville de Mexico. L'expérience montre qu'il est nécessaire, pour assurer le respect de la réglementation, de mettre en place un programme très complet dont les principaux éléments sont les suivants.

- a) Un service d'inspection et de réglementation restreint mais souple et efficace, doté d'un personnel hautement qualifié capable de reconnaître les cultures interdites et l'emplacement des zones à risque s'agissant de la qualité des eaux résiduaires. Le personnel de ce service doit avoir appris à s'acquitter de ses fonctions avec dignité et honnêteté, en essayant de jouer un rôle de conseillers éducateurs et non de policiers. Il est souhaitable d'utiliser un manuel de l'inspecteur et des imprimés normalisés. Dans une situation normale, la responsabilité directe de la bonne application des réglementations imposées aux cultures incombe à ceux qui délivrent les permis d'irrigation ainsi qu'aux agents des services de vulgarisation agricole.
- b) La délivrance des permis sur la base d'un inventaire complet des terres et des exploitations où l'on utilise des eaux résiduaires. L'imprimé utilisé pour le permis doit comporter des renseignements tels que le nom de l'intéressé, l'emplacement des terres, la surface à irriguer, les besoins en eau et le mode d'épandage, la nature des récoltes et les modalités de commercialisation. Les permis doivent être renouvelés après chaque campagne.
- c) Un programme de formation bien organisé prévoyant le mode de recrutement du personnel. Il faut insister sur le recrutement de personnel de niveau universitaire, notamment des ingénieurs sanitaires.
- d) Une information relative à la réglementation des cultures doit être diffusée de façon efficace. Une large publicité est nécessaire pour faire connaître au personnel des services de réglementation, aux agriculteurs et au grand public en général les risques que comporte pour la santé l'utilisation d'eaux résiduaires non traitées, ainsi que les raisons qui justifient la réglementation adoptée au sujet de certaines cultures et persuader tous les intéressés que leur participation est indispensable. Le grand public doit recevoir une éducation qui lui permette de comprendre la nécessité d'une telle réglementation touchant la santé publique et de se sentir plus concerné par l'amélioration de la santé publique et de la sécurité en matière de production alimentaire.
- e) L'intégration des activités exige une coopération et une coordination entre divers organismes officiels, par exemple ceux qui sont chargés de la santé publique, de l'agriculture, de l'élevage ou des eaux, aux niveaux national, régional et local. Les organismes responsables du commerce et des transports doivent être informés de l'existence d'une réglementation qui stipule les endroits où il est possible d'irriguer les cultures avec des effluents et qui interdit cette pratique pour certaines catégories de produits.

**(Encadré 8.6 suite)**

- f) Pour être efficace, l'organisme réglementaire doit être créé par un décret officiel précisant ses activités et bénéficier du soutien résolu des organismes chargés de faire respecter la loi. Un service juridique consultatif est nécessaire.
- g) Il faut prévoir les moyens nécessaires pour établir et surveiller la qualité chimique et microbiologique de l'eau, du sol et des plantes cultivées. Cela existe des moyens de laboratoire suffisants pour les analyses.
- h) Le périmètre d'irrigation doit tenir à jour des dossiers de contrôle des exploitations et procéder à une évaluation périodique des données sur les maladies associées aux excreta.
- i) L'ensemble du système de contrôle des cultures exige une supervision technique et administrative attentives de façon, par exemple, qu'aucun inspecteur ne risque de se laisser corrompre, ce qui rendrait tout le système inutile.
- j) Des services de secrétariat et des moyens de transport sont indispensables à l'exécution du programme.

Source : Romero (1987).

n'a jamais été appliquée en pratique pour faire respecter les limitations imposées et elle soulèverait de nombreuses difficultés. En premier lieu, il faudrait procéder à une masse d'expériences pour définir les normes de qualité réalisables. Une norme fixée *a priori* risque en effet de ne pas être respectée, même dans le cas de produits cultivés sans l'utilisation de déchets, et toute tentative de l'imposer serait vouée à l'échec. Par ailleurs, il n'est pas toujours facile de retrouver l'origine d'un lot de produits agricoles prélevés par échantillonnage sur un étal, au marché, et encore moins quand les résultats de l'examen microbiologique sont connus un ou deux jours plus tard. En troisième lieu, un échantillonnage régulier dans les nombreux points de vente de denrées alimentaires exigerait de la part des laboratoires une capacité d'analyse considérable. En revanche, le prélèvement de quelques échantillons sur les étals en vue de leur examen et la menace de mesures contre ceux qui produisent ou vendent des produits alimentaires fortement contaminés pourraient avoir un effet sur l'hygiène alimentaire en général, y compris les cultures pratiquées avec l'utilisation de déchets dans des zones ignorées des autorités sanitaires.

## Epandage

**Eaux résiduaires.** L'irrigation par aspersion nécessite des mesures rigoureuses visant à protéger la main-d'œuvre et les résidents des zones limitrophes contre l'exposition à des agents infectieux. En fait, ce mode d'irrigation n'a pas grandes chances d'être pratiqué en dehors de systèmes importants et centralisés, gérés par un seul organisme qui est relativement bien placé pour imposer l'application de ces autres mesures.

C'est lorsqu'on pratique l'irrigation par submersion qu'il est *a priori* le plus nécessaire d'apporter les modifications à la méthode actuelle de façon à réduire les risques pour la santé. Les agriculteurs risquent d'être passablement résistants à l'idée de changer de méthode (par exemple en adoptant l'irrigation «à la raie») car cela suppose le plus souvent pour eux un travail et des dépenses supplémentaires. Il peut être nécessaire de les aider à niveller leurs champs et éventuellement à les labourer selon les courbes de niveau pour créer les rigoles. Ce changement contribue aussi à réduire la prolifération des moustiques et les autres formes d'exposition à la maladie qu'entraîne l'obligation, pour le personnel, de patauger dans les eaux résiduaires qui recouvrent les champs. En plus de cette diminution du risque pour la santé des agriculteurs, d'autres arguments peuvent les inciter à changer de méthode, par exemple l'efficacité supérieure d'autres techniques d'irrigation quand on dispose d'eau en quantité limitée et la réduction de la nuisance constituée par les moustiques. Le service de vulgarisation agricole est le mieux placé pour inciter les agriculteurs à changer de méthode d'irrigation. La tâche est facilitée quand l'utilisation des eaux résiduaires donne lieu au prélèvement d'une taxe suffisamment élevée pour pousser les intéressés à éviter tout gaspillage.

L'irrigation souterraine ou localisée (au goutte-à-goutte ou à l'aide de tubulures de refoulement) peut assurer une protection encore meilleure contre la contamination tout en permettant une utilisation plus efficace de l'eau avec, souvent, des rendements supérieurs. Mais c'est une technique coûteuse qui n'a encore jamais été utilisée à grande échelle dans le cas de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires. Un traitement extrêmement fiable est nécessaire pour éviter le colmatage des petits orifices (éjecteurs) par lesquels l'eau se déverse lentement dans le sol; ce risque n'existe cependant pas avec les tubulures de refoulement.

**Excreta.** Comme dans le cas des eaux résiduaires, le service de vulgarisation agricole est parfois le mieux à même de promouvoir des pratiques hygiéniques lors de l'épandage des excreta. Lorsqu'un organisme municipal régit l'approvisionnement en gadoues, il peut parfois favoriser un épandage avant le début de la période de végétation en n'assu-

rant l'approvisionnement en gadoues qu'à certaines époques de l'année. Autre possibilité: l'organisme qui contrôle la distribution des gadoues peut se charger lui-même de l'épandage dans les champs en prélevant en contrepartie une taxe auprès des agriculteurs. Les ouvriers qui manipulent les excreta sont alors employés par un seul et même organisme, ce qui facilite la mise en œuvre de mesures visant à limiter leur exposition.

## **Limitation de l'exposition humaine**

Les mesures visant à limiter les risques de maladies diarrhéiques en général et à promouvoir une bonne prise en charge des malades constituent des éléments bien connus des soins de santé primaires. Ces mesures portent sur l'éducation pour la santé, notamment en ce qui concerne l'hygiène domestique et l'allaitement maternel, et l'usage de solutions de réhydratation par voie orale préparées à partir de sachets pré-dosés ou d'ingrédients dont dispose la famille.

Une mesure évidente consiste à assurer un approvisionnement en eau saine et des moyens d'assainissement. Limiter l'exposition des ouvriers agricoles à la contamination fécale dans les champs risque d'être sans grand effet s'ils continuent à être exposés à l'infection du fait de l'eau qu'ils boivent et du fait de leur environnement domestique, faute de ces installations de base. Des précautions particulières s'imposent pour que l'utilisation des déchets d'origine humaine n'entraîne pas la contamination des puits ou autres sources d'eau potable du voisinage.

Lorsqu'ils emploient une main-d'œuvre salariée, les exploitants agricoles ont le devoir de protéger leur personnel contre l'exposition aux maladies, comme la législation sur la médecine du travail leur en fait d'ailleurs l'obligation dans de nombreux pays. Cette obligation doit parfois être rappelée aux employeurs à qui l'on donnera également des directives sur les mesures à prendre, par exemple la distribution des vêtements protecteurs, notamment de chaussures. Souvent, les employeurs se lamentent à cette idée, car, disent-ils leurs ouvriers ne les utilisent pas ou les vendent ou encore les mettent de côté pour les porter dans des occasions particulières. Tout effort visant à encourager les employeurs à distribuer des vêtements protecteurs doit s'accompagner d'efforts encore plus grands pour convaincre les employés de les porter.

S'agissant des personnes qui manipulent les produits récoltés, les mesures destinées à limiter leur exposition peuvent être appliquées sensiblement de la même façon que dans le cas des ouvriers agricoles. Lorsqu'ils travaillent tous pour un petit nombre d'employeurs, la limi-

tation de l'exposition s'intègre dans un programme général de médecine du travail. En revanche, quand il existe un grand nombre de petits commerçants qui vendent les récoltes ou les utilisent pour préparer des produits alimentaires, il est difficile d'appliquer des mesures d'hygiène, sauf s'ils sont tous rassemblés dans un marché. De toute façon, la plupart des marchés sont soumis à des inspections dans le cadre de la santé publique, et les mesures de base visant à limiter l'exposition peuvent être une bonne chose, que les denrées manipulées proviennent ou non de champs fertilisés à l'aide de déchets. Outre qu'elles protègent de la contamination les personnes qui manipulent ces produits, ces mesures peuvent contribuer à protéger d'autres produits d'une contamination par ces mêmes personnes.

De plus, les marchés constituent le meilleur endroit pour faire connaître aux consommateurs les précautions souhaitables en matière d'hygiène au sujet des produits qu'ils achètent. Il est sans aucun doute bon d'indiquer aux consommateurs tout ce qu'ils peuvent faire pour éviter de s'exposer aux infections. Mais on ne peut pas être certain que les conseils seront suivis, spécialement lorsque cela impliquerait l'abandon d'habitudes anciennes.

Les personnes qui ne sont pas concernées par l'utilisation d'eaux résiduaires ou d'excreta sont les mieux à même de veiller à ce que leur santé ne soit pas mise en danger par les autres, dès lors qu'on leur a expliqué les précautions nécessaires et les risques qu'ils courent, avec leur famille, s'ils les négligent. Certes, un inspecteur de l'administration peut veiller à la mise en place de clôtures et de panneaux de mise en garde, mais ce sont les voisins vigilants qui seront les premiers à voir si clôtures et panneaux ont besoin d'être réparés ou remplacés ou si l'irrigation par aspersion commence à atteindre des terrains trop proches de leur habitation. La création d'un comité sanitaire des résidents peut constituer l'instance à partir de laquelle s'organisera une campagne d'éducation pour la santé et se créera un organisme à gestion locale chargé de surveiller la réutilisation des déchets.

Le traitement (chimiothérapie) des ouvriers agricoles, de leurs familles et des autres groupes exposés au risque d'helminthiase intestinale est relativement facile à conduire dans un système organisé d'irrigation au moyen d'eaux résiduaires, même s'il exige parfois du personnel de santé complémentaire pour soigner une population nombreuse. Les soins ainsi dispensés sont parfois fort bien accueillis et ils constituent une excellente occasion pour lancer du même coup des activités d'éducation en matière d'hygiène et faire largement connaître des mesures simples de protection personnelle. Le coût de la chimiothérapie peut être supporté par les employeurs quand les champs sont confiés à du personnel salarié ou à des métayers, ou être imputé sur les taxes

qui sont prélevées, le cas échéant, lors de la délivrance des permis d'irrigation.

Quand les eaux résiduaires sont utilisées par de nombreuses exploitations agricoles dispersées et de petite taille, les problèmes de logistique se compliquent et il peut être très onéreux de repérer et de soigner les personnes exposées. Un problème supplémentaire se pose quand l'utilisation des eaux résiduaires est illicite, car les agriculteurs hésitent parfois à se faire connaître pour être soignés, de peur de poursuites. Il faut parfois les rassurer en proclamant une amnistie et en confiant le programme de chimiothérapie à un personnel différent de celui qui est chargé de faire appliquer le règlement sanitaire.

Parmi les personnes qui habitent à proximité de champs ou de bassins où l'on utilise des déchets figurent certainement des ouvriers agricoles, avec leur famille, de sorte qu'ils sont doublement exposés à l'infection. Il est parfois plus facile de tous inclure dans une campagne de traitement de masse destinée aux ouvriers agricoles que d'essayer de déterminer l'emploi de chaque individu.

Le recensement des sujets infectés qui doivent être soignés peut être long et coûteux. Quand la prévalence de l'infection est relativement élevée, le traitement de masse de la totalité de la population exposée est parfois une solution intéressante. Mais cette méthode a l'inconvénient d'entraîner des dépenses inutiles pour le traitement de personnes non infectées. Le choix entre une chimiothérapie de masse et une chimiothérapie sélective, limitée aux sujets infectés, dépend donc essentiellement de la prévalence de l'infection en cause et du coût relatif du dépistage et du traitement des malades.

## Coûts

Le choix de la méthode à adopter doit tenir compte non seulement de l'efficacité des diverses solutions, mais aussi de leur coût. Si le coût des mesures retenues risque de dépasser l'avantage économique de l'utilisation des déchets, il importe de se demander si des mesures moins coûteuses ne pourraient pas suffire ou s'il vaut vraiment la peine d'utiliser les déchets. Dans la plupart des cas, les avantages justifient *a priori* les coûts, mais il faut prendre des dispositions sur le plan financier pour que les coûts soient couverts par une source de financement convenable. Ces problèmes sont examinés à la section 8.4.

## 8.3 Nouveaux systèmes

### 8.3.1 Identification des projets

L'amélioration des systèmes en place doit généralement avoir la priorité sur la création de nouveaux systèmes. Cette amélioration peut être nécessaire pour augmenter les rendements en agriculture ou en aquaculture ou réduire les risques pour la santé. Il faut s'intéresser non seulement aux perfectionnements techniques nécessaires (voir section 7.2.5), mais aussi aux améliorations possibles sur le plan de la gestion, de l'exploitation et de l'entretien.

L'idéal serait de repérer les nouveaux projets et d'en déterminer la priorité relative dans le cadre d'un plan national d'utilisation des eaux résiduaires et des excréta. Mais, souvent, les possibilités de mettre en place de nouveaux systèmes se présentent à l'occasion de grands projets concernant les eaux résiduaires, et il ne faut pas forcément les rejeter sous prétexte qu'il n'existe pas de plan national en vue de la réutilisation de ces eaux. Au contraire, la réutilisation des déchets constitue une possibilité qui mérite toujours d'être envisagée lorsqu'on établit des plans pour l'occupation des sols, le développement de l'habitat ou la gestion des déchets: l'évaluation des perspectives qui s'offrent à la réutilisation des déchets doit être incluse dans le mandat de l'expert-conseil.

Par ailleurs, il faut que les nouveaux systèmes soient viables, offrent la perspective d'un bon taux de rentabilité agricole ou aquicole, sans risques importants pour la santé et pour un minimum de frais. En outre, il faut qu'on puisse au moins envisager la création d'un cadre institutionnel local satisfaisant pour la planification, la mise en œuvre et l'exploitation du système dans de bonnes conditions.

L'établissement d'un plan directeur est nécessaire au stade du recensement des projets. Il est destiné à déterminer les dimensions et l'ampleur du projet et doit s'appuyer sur des données et décisions préliminaires concernant les points suivants:

- volume disponible et qualité des excréta/eaux résiduaires;
- superficie nécessaire en terrains/bassins;
- espèces végétales/pisciaires envisagées;
- qualité requise pour les excréta/eaux résiduaires et nécessité corrélatrice d'un traitement éventuel;
- avant-projet du système de transport des excréta/eaux résiduaires; besoins d'entreposage;

- choix préliminaire des techniques d'épandage;
- aspects institutionnels et organisationnels;
- législation et réglementation en vigueur sur l'utilisation des déchets;
- justification économique et financière préliminaire du projet, avec des précisions sur les débouchés de la production;
- calendrier du projet;
- nécessité ou non d'un projet pilote.

La politique à adopter en matière de protection sanitaire (voir section 7) doit faire partie intégrante de cette étude préliminaire. Bon nombre des considérations de principe qui s'appliquent à l'amélioration d'une pratique existante (voir section 8.2) valent aussi lorsqu'on envisage un nouveau système. Il est également souhaitable de procéder à ce stade à l'examen préliminaire de l'environnement et de déterminer, dans leurs grandes lignes, les principales conséquences à prévoir sur le plan écologique.

### **8.3.2 Projets pilotes**

Un projet pilote est particulièrement nécessaire dans les pays qui n'ont pratiquement aucune expérience de l'utilisation planifiée des excreta ou des eaux résiduaires ou lorsqu'on envisage l'introduction de nouvelles techniques (par exemple l'irrigation localisée). La protection de la santé ne représente qu'un problème parmi de nombreux autres problèmes interdépendants dont la solution est difficile sans l'expérience locale que peut apporter un projet pilote. En principe, ces problèmes comportent des aspects techniques et économiques importants, notamment la faisabilité du projet lui-même, de sorte que des essais préliminaires à échelle réduite sont souvent essentiels en toute hypothèse. Un projet pilote peut aussi aider à repérer d'éventuels risques pour la santé et à élaborer des solutions pour y parer.

Les propositions d'introduire l'utilisation de déchets en agriculture ou en aquaculture interviennent souvent à l'occasion de nouveaux travaux d'assainissement, en particulier la construction de nouvelles stations d'épuration des eaux résiduaires; cependant, un projet pilote conduit dans une station existante voisine peut apporter les renseignements dont on a besoin à l'avance.

Dans certaines régions du monde où un nouveau projet a toutes les

chances d'être économiquement viable, il y a fort à parier que les déchets d'origine humaine sont déjà utilisés d'une façon ou d'une autre. Il vaut certainement la peine d'étudier les pratiques en vigueur dans la région, ainsi peut-être que dans les pays voisins, avant d'envisager de nouveaux projets. En fait, il faut au moins que les pouvoirs publics examinent comment on pourrait rendre les pratiques en vigueur exemptes de risques pour la santé avant de se lancer dans de nouvelles entreprises dans ce secteur.

Du point de vue de l'agriculture (ou de l'aquaculture), l'intérêt d'un projet pilote n'est pas seulement d'ordre expérimental : il sert aussi de démonstration. Il faut faire un choix représentatif de cultures locales ou exotiques et utiliser un plan d'expérience à blocs complets randomisés, comportant au moins trois répétitions.

Dans le cas de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires traitées ou de gadoues décantées, il faut procéder à des vérifications sur des eaux non polluées, avec ou sans addition d'engrais minéraux ; l'utilisation d'eaux résiduaires ou de gadoues diluées peut être nécessaire dans le cas de cultures sensibles à l'azote quand cet élément a une concentration élevée. Lorsqu'on se sert d'excreta ayant subi un compostage ou une digestion thermophile, il faut les épandre dans les parcelles expérimentales avant la plantation, comme on le fait avec les gadoues qui sont enfouies dans des tranchées. Les projets pilotes doivent être organisés de façon similaire en aquaculture : il faut étudier les nouvelles espèces de poissons ou de végétaux comestibles en expérimentant différents déchets (par exemple, l'effluent recueilli à la sortie d'un système de bassins, un compost, le contenu des latrines) à différents taux d'épandage. Des données sont nécessaires non seulement sur les rendements, mais aussi sur l'importance de la contamination microbiologique, la fixation des métaux lourds et les répercussions au niveau du sol et des eaux souterraines.

Un projet pilote doit fonctionner pendant au moins une période de végétation, ou au moins une année lorsqu'on veut étudier à la fois la récolte d'hiver et la récolte d'été. Le projet doit être planifié très soigneusement de façon que le travail nécessaire ne soit pas sous-estimé et puisse être effectué correctement ; sans cela, il faudra recommencer l'année suivante. Après la période expérimentale et en cas de succès, on peut faire du projet pilote un projet de démonstration en le dotant de moyens de formation pour les exploitants et agriculteurs locaux.

### 8.3.3 Planification des projets: aspects techniques

La planification détaillée des systèmes d'utilisation des excreta et des eaux résiduaires doit se faire selon les méthodes habituellement pratiquées dans le pays pour la planification des projets d'agriculture et d'aquaculture, compte tenu en plus, le cas échéant, des conditions exigées par les organismes extérieurs de financement. La discussion qui suit est axée sur les besoins particuliers qu'impose la planification dans le cas d'un projet d'utilisation des excreta et/ou des eaux résiduaires où il faut prévoir des mesures de protection de la santé. Pour le reste, la planification doit répondre aux mêmes conditions qu'un système d'irrigation et de fertilisation où l'on n'utilise pas de déchets d'origine humaine.

La masse d'informations à rassembler est importante, et de nombreuses décisions doivent être prises en vue d'établir un plan détaillé du nouveau projet. Les principaux aspects techniques qui doivent être abordés dans le plan sont énumérés dans l'encadré 8.7. Dans plusieurs cas, il existe des interactions comme le montrent les deux exemples suivants: dans un système d'irrigation, la nature des plantes cultivées influe sur les modalités saisonnières de l'irrigation et, par conséquent, sur les installations d'entreposage nécessaires; l'irrigation en sylviculture permet d'utiliser utilement les eaux résiduaires à des époques où elles ne sont pas nécessaires pour d'autres cultures, ce qui contribue à équilibrer la demande.

Pour chaque projet, le planificateur doit chercher à tirer de la production un bénéfice net maximal compte tenu des contraintes en matière de main-d'œuvre, de la nécessité de protéger la santé et de réduire les coûts au minimum. Il faut pour cela estimer le coût des divers travaux, à savoir les gros travaux de génie civil pour l'entreposage, le traitement ou le transport des déchets, la préparation des terrains et l'infrastructure d'irrigation, sans oublier le coût du personnel, du traitement, du pompage et de l'entretien ainsi que le coût des autres facteurs de production agricoles.

Pour évaluer les bénéfices à escompter, il faut non seulement prévoir le rendement des cultures mais aussi le niveau des cours. Cela nécessite une étude de marché pour établir s'il existe des débouchés pour les cultures prévues. Ce plan est particulièrement important quand la pratique sera limitée à certaines cultures afin de protéger la santé ou lorsque les plantes à cultiver nécessitent un traitement industriel; dans ce dernier cas, il faut que la capacité correspondante soit suffisante.

Les projets de réutilisation de déchets n'atteignent pas immédiatement leur « régime de croisière ». Le plan doit prévoir des délais raisonnables pour chacune des phases: la réunion des fonds nécessaires, la construction des installations indispensables et la préparation du ter-

## **Encadré 8.7 Données techniques à faire figurer dans le plan d'un projet**

### **Irrigation au moyen d'eaux résiduaires**

- Taux actuel et prévu de production d'eaux résiduaires; proportion actuelle et prévue représentée par les effluents industriels; degré de dilution par les eaux de surface.
- Installations de traitement existantes ou nécessaires; taux d'élimination des agents pathogènes, qualité physico-chimique.
- Superficie irriguable: étendue, emplacement, type (terre vierge, terrain agricole cultivé, parcs publics); natures des sols, drainage, pentes (des cartes sont nécessaires).
- Géologie locale et risque de pollution des eaux souterraines.
- Transport des eaux résiduaires jusqu'aux champs; stations de pompage.
- Besoins de stockage des eaux résiduaires, compte tenu de la nécessité éventuelle de limiter l'irrigation à la journée ou à la nuit, d'utiliser un excédent d'eaux résiduaires provenant d'une saison où l'irrigation est inutile (par exemple la saison des pluies) ou de conserver les eaux résiduaires d'une saison sur l'autre pour permettre la production de cultures plus rentables ou de cultures d'exportation ou encore de cultures exigeant un traitement plus poussé des eaux résiduaires; ou dispositions en vue de l'élimination des eaux résiduaires (si l'on envisage uniquement l'irrigation à la saison sèche).
- Méthodes d'épandage des eaux résiduaires, pour l'irrigation avec ou sans limitation.
- Elimination des eaux de drainage ou utilisation de ces eaux pour irriguer des cultures résistantes au sel.
- Diversité des cultures à irriguer; qualité exigée des eaux résiduaires et son influence sur le traitement, selon les espèces végétales en cause; quand une qualité différente est nécessaire, méthodes possibles pour y parvenir (par exemple, utilisation de l'effluent recueilli à la sortie d'un bassin facultatif pour l'irrigation avec limitation et d'un bassin de maturation pour l'irrigation sans limitation).
- Besoins des plantes cultivées en eau et en nutriments supplémentaires; sensibilité des cultures à l'azote et au bore; apport d'eau nécessaire pour compenser le lessivage.
- Estimation des rendements à l'hectare.
- Politique générale de protection sanitaire.

*(Encadré 8.7 suite)*

**Utilisation d'excreta comme engrais en agriculture**

- Taux actuel et prévu de production d'excreta/boues.
- Installations de traitement existantes ou nécessaires; taux d'élimination des agents pathogènes, qualité physico-chimique.
- Superficie à amender: étendue, emplacement, nature de sols.
- Transport des excreta/boues bruts ou traités jusqu'aux champs (ramassage par les agriculteurs ou distribution par l'organisme chargé du traitement).
- Besoins de stockage des excreta/boues.
- Taux et méthodes d'épandage des excreta/boues.
- Mélange de cultures à amender et, pour chacune, qualité nécessaire pour les excreta/boues, besoins en eau et en nutriments supplémentaires; conséquences pour le traitement des déchets.
- Estimation des rendements à l'hectare.
- Politique de protection sanitaire.

**Utilisation d'excreta et d'eaux résiduaires en aquaculture**

- Taux actuel et prévu de production des déchets (excreta, boues ou eaux résiduaires); proportion représentée par les effluents industriels; dilution par les eaux de surface.
- Installations de traitement des déchets existantes ou nécessaires; taux d'élimination des agents pathogènes, qualité physico-chimique.
- Superficie existante et superficie nécessaire des bassins: étendue,
- emplacement, nature des sols (besoins en matière de revêtement); nécessité éventuelle de bassins de dépuración.
- Evaporation (nécessité d'eau d'appoint).
- Transport des déchets traités jusqu'aux bassins (ramassage des excreta et des boues traitées par les agriculteurs et distribution par l'organisme chargé du traitement).
- Besoins de stockage des déchets.

*(Encadré 8.7 suite)*

- Taux et méthodes d'épandage des déchets.
- Espèces de poissons et de plantes aquatiques à élever ou cultiver et besoins correspondants sur le plan de la qualité des déchets et des nutriments supplémentaires.
- Estimation du rendement annuel en poissons ou en végétaux à l'hectare de bassin.
- Possibilité d'élever des canards dans ces bassins; nourriture nécessaire.
- Politique de protection sanitaire.

rain avant le démarrage du projet. Au-delà, le plan doit prévoir la configuration du projet année par année. Dans le cas d'un projet d'irrigation, l'horizon de planification se situe souvent à 20 ans.

Dans bien des cas, il est judicieux de prévoir des débuts modestes, suivis d'une expansion progressive du projet les années suivantes (voir encadré 8.8). Cela laisse le temps de former les agriculteurs et les personnels aux nouvelles méthodes et de tirer des enseignements des premiers stades, utiles pour la suite. De plus, on a ainsi la certitude que la production n'atteindra pas un niveau incompatible avec le volume actuel des déchets ou l'importance de la demande des plantes ainsi cultivées.

L'évolution progressive du volume, mais aussi de la qualité des eaux résiduaires disponibles, a des répercussions sur les projets d'irrigation au moyen de ces eaux. A mesure que la population desservie par le réseau d'égouts se développe, le volume des eaux résiduaires augmente, la dilution par les eaux de pluie et par les infiltrations d'eaux souterraines dans les égouts diminue, de même que la durée de rétention dans les stations de traitement des eaux résiduaires. Lorsque l'on construit un nouveau réseau d'égouts, la proportion des logements qui y sont raccordés risque d'être très faible au départ, de sorte qu'il faut en tenir compte dans le plan du projet.

### **Usage multiple des déchets**

Il convient également de voir s'il ne serait pas possible de mettre en place des systèmes intégrés comportant un usage multiple des déchets car cette solution réduit souvent les coûts. Par exemple, lorsqu'on utilise pour l'irrigation des eaux résiduaires provenant d'une série de bassins de stabilisation, on peut y élever des poissons à partir du troi-

### **Encadré 8.8 Irrigation au moyen d'eaux résiduaires au Koweït**

L'utilisation des eaux résiduaires pour l'irrigation a débuté au Koweït au milieu des années 70 sur une échelle limitée, pour la culture de la luzerne, principale plante fourragère servant à l'alimentation du bétail pour l'industrie laitière. Compte tenu de l'expérience acquise, la méthode a connu une première phase d'expansion dix ans plus tard, portant à plus de 1 700 ha la superficie agricole totale concernée. On prévoit aussi la culture d'ail et d'oignons, en plus de la luzerne, avec irrigation par aspersion. Pour les aubergines et les piments, on aura recours à l'irrigation par submersion ou par infiltration à la raie.

Le projet sera encore développé lorsqu'on disposera d'un volume accru d'eaux résiduaires traitées. L'objectif est d'assurer l'autosuffisance du Koweït en lait, pommes de terre, oignons et ail d'ici à l'an 2010. De plus, on envisage un programme ambitieux de boisement pour protéger du vent et de la poussière les grandes routes et les nouvelles agglomérations.

Toutes les zones où l'on utilise des eaux résiduaires sont entourées de clôtures pour en interdire l'accès au public, et les ouvriers agricoles sont soumis à des visites médicales régulières. Le fait que l'exploitation agricole dépende d'une seule société qui est approvisionnée en eaux résiduaires traitées par le ministère des Travaux publics a permis d'organiser efficacement la protection de la santé et le projet dans son ensemble.

*Source : Cowan & Johnson (1985).*

sième bassin; de même, on peut souvent implanter les installations de traitement des excreta et des boues dans la station d'épuration des eaux résiduaires et utiliser le produit traité dans les mêmes champs que ceux qu'on irrigue au moyen des eaux résiduaires traitées (encore qu'il faille veiller à ne pas surcharger le système d'éléments nutritifs, spécialement d'azote); enfin, dernier exemple, il est possible d'utiliser pour l'irrigation l'effluent recueilli à la sortie des bassins d'aquaculture. La production de biogaz peut également être associée à d'autres utilisations des déchets s'il existe une demande locale de gaz.

#### **8.3.4 Planification des projets: aspects institutionnels**

On trouvera une étude approfondie de l'organisation des systèmes d'irrigation dans une publication récente de la FAO (Sagardoy, 1982), qui vaut en grande partie pour l'organisation des systèmes d'utilisation des excreta en agriculture et l'utilisation des excreta et eaux résiduaires en aquaculture. Les considérations qui suivent sont donc axées sur les aspects qui concernent plus spécialement ces derniers systèmes.

Dans une assez large mesure, un système de réutilisation des déchets est organisé en fonction des modalités d'occupation du sol et des ins-

titutions en place. Les mesures de protection sanitaire sont plus faciles à mettre en œuvre efficacement quand le système est géré en bloc, que ce soit par une société privée, une coopérative ou un organisme public (voir encadré 8.8). En revanche, quand les terrains en cause sont déjà cultivés par de petits exploitants, il est généralement impossible de modifier ce régime d'occupation du sol lorsqu'on introduit l'utilisation de déchets. En pareil cas, il est à peu près indispensable de créer, sous une forme ou une autre, une association d'utilisateurs et un conseil conjoint de gestion en vue de mettre en œuvre les mesures de protection sanitaire qui nécessitent la coopération des usagers.

Parfois, il faut aussi fournir aux petits exploitants des garanties quant à leur droit à l'exploitation du sol et à l'utilisation des eaux résiduaires en volume suffisant et aux époques convenables, spécialement si l'on attend d'eux un apport plus élevé en numéraire ou l'adoption de cultures qui mettent plus longtemps à mûrir. C'est parfois difficile quand les propriétaires fonciers ont acheté du terrain dans un but spéculatif et que l'expansion urbaine a déjà provoqué l'envolée des prix du terrain à la périphérie.

Les systèmes importants (à partir d'une superficie de 200 ha ou de 500 exploitations agricoles) exigent, pour leur gestion, du personnel professionnel à plein temps dont la rémunération peut être imputée sur le montant du fermage, des taxes prélevées sur l'eau ou, lorsque ce même personnel assure la gestion de l'exploitation et emploie les ouvriers agricoles, sur le montant de la vente des produits.

L'organisme qui gère le système, soit en l'exploitant comme une plantation, soit en répartissant les eaux résiduaires entre les divers exploitants agricoles, est souvent distinct de l'organisme d'assainissement responsable de la collecte et du traitement des eaux résiduaires. Cette particularité peut lui permettre d'avoir des relations plus étroites avec le ministère de l'agriculture ou celui des ressources hydriques et lui laisse une plus grande liberté d'action, ce qui peut être avantageux étant donné les incertitudes de la météorologie et des cours agricoles; en revanche, l'absence d'action possible sur le traitement fait qu'il faut s'en remettre aux bonnes relations établies avec un autre organisme pour l'application d'une mesure qui est généralement la plus importante pour la protection de la santé.

Dans certains des systèmes les plus efficaces (par exemple celui de Werribee, en Australie - voir section 3.1.1), l'ensemble des activités, depuis la collecte des eaux résiduaires jusqu'à la vente du bétail ou des récoltes, en passant par le traitement et l'épandage des déchets, relève d'un seul et même organisme. Quand cette formule est impossible, un accord est nécessaire pour assurer la coordination intersectorielle au niveau local, de même qu'aux niveaux régional ou national (voir section 8.1.2). Il est particulièrement important que les domai-

nes de compétence de chaque organisme en cause soient clairement définis.

Une mesure courante, en particulier dans les systèmes où l'on utilise les eaux résiduaires provenant d'un réseau public d'égouts, consiste à délivrer des permis pour l'utilisation de cette ressource. Ces permis sont en général délivrés par l'administration locale chargée de l'agriculture ou des ressources hydriques ou encore par l'organisme qui dirige le système de distribution des eaux résiduaires. Ces permis sont souvent l'objet de dispositions dans la législation en vigueur sur les ressources hydriques de façon à empêcher un puisage intempestif de l'eau, mais lorsqu'on utilise des déchets, on peut subordonner la délivrance et le renouvellement d'un permis à l'observation de pratiques hygiéniques (méthodes d'épandage des déchets, la limitation de

### **Encadré 8.9 Gestion de l'utilisation des eaux résiduaires à Calcutta**

Les eaux résiduaires de Calcutta sont transportées jusqu'aux marécages situés à l'est de la ville par deux canaux principaux d'où elles se déversent dans un réseau complexe de canaux secondaires et tertiaires. Au-delà, une quantité précise est introduite dans un vaste système de bassins au moyen de simples vanes; au fil des ans, les pêcheurs ont appris à apprécier la quantité nécessaire en se guidant sur leur goût, leur odorat et leur vue.

Il existe dans la région environ 160 propriétaires de bassins, dont la plupart sont des propriétaires non exploitants représentés sur place par un régisseur. Chacun d'eux emploie de 50 à 200 pêcheurs, qui sont en majeure partie des saisonniers, et possède jusqu'à 400 ha. Certains ont loué le terrain à la municipalité de Calcutta; il existe en outre trois coopératives de pêcheurs qui ont leur propres bassins. Au total, quelque 4 000 familles vivent des poissons qu'ils capturent dans les bassins qui représentent une superficie totale d'environ 5 000 ha.

Les eaux résiduaires sont utilisées en partie pour irriguer les cultures maraîchères pratiquées sur un dépôt d'ordures voisin ou quelque 2 000 familles exploitent une superficie de 1 400 ha. Un bail a été accordé en 1879 par les autorités municipales mais il est actuellement contesté; il existe désormais un régime foncier à trois étages, les titulaires du bail louant les jardins édifiés sur le tas d'ordures à des locataires qui sont eux-mêmes payés par les ouvriers agricoles.

Plus loin en aval, les eaux résiduaires traitées dans le réseau de bassins servent à l'irrigation de rizières, d'une superficie d'environ 6 500 ha, qui procurent la totalité ou une partie de leur revenu à 5 000 familles.

Un comité mixte, réunissant les propriétaires de bassins, les propriétaires des terres en aval et les autorités municipales de Calcutta, a récemment été créé pour résoudre les problèmes d'intérêt commun, par exemple les irrégularités de l'approvisionnement en eaux résiduaires et... le vol des poissons par des bandes armées!

Source : Strauss (1986b)

On trouvera à la section 3 des précisions complémentaires sur l'utilisation des eaux résiduaires à Calcutta.

leur emploi à certaines cultures et de limitation de l'exposition). Un système de permis peut également s'envisager dans le cas des excréta, spécialement lorsqu'ils sont collectés par un organisme municipal, et dans celui de l'aquaculture.

Il est courant aussi que l'organisme qui gère la distribution des eaux résiduaires traite avec les agriculteurs ou les propriétaires de bassins d'aquaculture par l'intermédiaire d'associations d'usagers qui sont souvent une émanation d'institutions traditionnelles. Les permis d'utilisation des déchets peuvent alors être délivrés aux associations directement, ce qui simplifie le travail administratif qu'entraîneraient des rapports individuels avec un grand nombre de petits utilisateurs et permet de déléguer aux associations le pouvoir de faire appliquer la réglementation dont le respect conditionne le renouvellement du permis.

Un autre organe qui a fait ses preuves dans de nombreux systèmes, par exemple à Calcutta (voir encadré 8.9), est le comité ou conseil de gestion mixte, qui peut réunir des représentants des associations, à côté des usagers particulièrement importants, des représentants des organismes chargés de la collecte et de la distribution des déchets ainsi que des représentants des autorités sanitaires locales. Même dans des organisations modestes, il est essentiel de prévoir un arrangement, par exemple un comité où siègent des représentants des collectivités, pour que les usagers participent à la gestion du projet.

## **Services de soutien**

Divers services de soutien mis à la disposition des agriculteurs sont particulièrement intéressants dans le contexte des mesures de protection sanitaire et doivent être envisagés en détail au stade de la planification. Il s'agit des services suivants:

- machines agricoles (vente et entretien, location);
- fourniture d'engrais supplémentaires, de canalisations pour l'irrigation, de vêtements protecteurs, etc.;
- crédit agricole;
- vulgarisation agricole et formation agronomique;
- services de commercialisation, spécialement lorsqu'on introduit de nouvelles cultures ou qu'on met en exploitation de nouvelles terres;

- soins de santé primaires, y compris le cas échéant des visites médicales périodiques pour les ouvriers agricoles et leur famille (voir section 7.5).

## Formation

Les besoins en matière de formation doivent être soigneusement évalués au stade de la planification, et il est souvent nécessaire de mettre en place des programmes de formation, spécialement à l'intention des agriculteurs et des exploitants des installations de traitement et de réutilisation, avant le début du projet de façon qu'on dispose d'un personnel correctement formé lorsqu'on en aura besoin. Le personnel d'exploitation a besoin d'être formé sur place à tous les aspects de la gestion du traitement, du réseau de distribution et des stations de pompage, tandis que les agriculteurs doivent recevoir une formation sur les pratiques agricoles les mieux adaptées à l'utilisation d'excreta et d'eaux résiduaires et que les techniciens doivent apprendre à prélever et à analyser les échantillons.

De même, il faut estimer l'importance des services de vulgarisation qui sont nécessaires en agriculture et en aquaculture et en tenir compte dans les prévisions de façon que ces services soient à la disposition des agriculteurs une fois le projet mis en route. Les fonctionnaires de ces services doivent eux-mêmes recevoir une formation aux méthodes d'exploitation agricole qui sont compatibles avec la protection de la santé, tandis que le personnel chargé de faire respecter la réglementation en matière d'assainissement doit connaître les limitations imposées à certaines cultures et recevoir une formation en médecine du travail, en hygiène alimentaire, etc.

Pour assurer la formation nécessaire, le mieux est de faire appel aux universités et autres établissements d'enseignement technique supérieur de la région; mais de nombreux pays n'ont pas les compétences spécialisées nécessaires, de sorte qu'une formation à l'étranger est parfois la seule solution dans l'immédiat, en attendant qu'une expérience suffisante soit acquise au niveau national. C'est un domaine dans lequel la coopération entre pays voisins peut être particulièrement fructueuse.

### 8.3.5 Législation

Lorsqu'on lance ou encourage de nouveaux projets en vue de l'utilisation d'eaux résiduaires ou d'excreta en agriculture ou en aquaculture, des mesures législatives sont parfois nécessaires. Dans bien des cas, il suffit d'amender la réglementation en vigueur, mais il faut parfois innover. Cinq domaines doivent retenir l'attention:

- création de nouvelles institutions ou attribution de nouveaux pouvoirs à des organismes existants;
- rôles respectifs de l'administration centrale et de l'administration locale dans ce secteur, et relations entre ces deux niveaux;
- droits d'accès aux déchets et propriété des déchets, notamment réglementation publique de leur utilisation;
- régime foncier;
- législation en matière de santé publique et d'agriculture: normes de qualité des déchets, limitation de la méthode à certaines cultures, méthodes d'épandage, médecine du travail, hygiène alimentaire, etc.

Ces divers aspects sont repris ci-dessous tour à tour.

### **Création de nouvelles institutions**

Une législation habilitante est parfois nécessaire pour la création d'un organisme national de coordination dans ce secteur (voir section 8.1.2) et la constitution d'organismes locaux chargés de la gestion des divers systèmes. Cela nécessite une certaine autonomie par rapport à l'administration centrale et la possibilité, soit de prélever une taxe sur les déchets distribués, soit de vendre les cultures ainsi produites.

### **Administration centrale et administration locale**

L'organisme local chargé de la gestion d'un système, ou du moins l'organisme qui assure la collecte des déchets, relèvent souvent de la municipalité. Si l'on cherche à encourager l'adoption de nouveaux projets dans le cadre d'une politique générale nationale, cela implique une coordination soigneuse et une définition précise des rapports entre administration centrale et administration locale. D'un côté, il est parfois nécessaire que l'administration centrale prévoie des incitations qui encouragent les autorités locales à promouvoir de nouveaux systèmes mais, d'un autre côté, il faut éventuellement prévoir des sanctions pour que les systèmes soient mis en œuvre sans faire courir de risques inutiles à la santé publique.

Les incitations peuvent consister en subventions, en prêts à faible taux d'intérêt ou en aide technique pour la mise en place des nouveaux systèmes. Une autre incitation, qui peut avoir son intérêt dans les

### **Encadré 8.10 Programme national mexicain d'utilisation des eaux résiduaires**

Le programme national d'utilisation des eaux résiduaires au Mexique vise à faire face à la demande croissante d'eau — de la part des exploitants agricoles, des industriels et des usagers domestiques. Ce programme part de l'idée que l'eau pure, dans les régions où l'on s'en sert pour l'irrigation ou dans l'industrie, peut être remplacée par des eaux résiduaires, ce qui permettrait de faire face à la demande de l'agriculture et de l'industrie tout en laissant un volume accru d'eau pure pour satisfaire la demande des particuliers. En outre, lorsqu'on utilise les eaux résiduaires au lieu de s'en débarrasser dans les cours d'eau, on réduit la contamination du milieu ambiant, ce qui contribue à la lutte anti-pollution. Le programme en est à l'heure actuelle au stade de la planification, et aucune décision définitive n'a encore été prise quant à son exécution.

Pour le moment, la majeure partie des eaux résiduaires non traitées provenant des villes grandes et moyennes est utilisée pour l'irrigation et c'est d'ailleurs la seule source d'eau utilisable à cette fin dans six des périmètres d'irrigation qui ont été créés. On utilise au total 2 400 millions de mètres cubes d'eaux résiduaires pour irriguer 156 000 hectares de terres. On prévoit de porter ce volume annuel à 2 600 millions de mètres cubes qui permettront d'irriguer une superficie de 237 000 ha répartie dans 17 périmètres d'irrigation créés dans six Etats de la fédération. De la sorte, on disposera d'un supplément d'eau pure pour satisfaire à la demande de 29 millions d'usagers, industriels et particuliers.

La planification du programme fera intervenir l'administration des Etats et celle des municipalités ainsi que des organismes représentant l'industrie, sous la coordination du Secrétariat à l'agriculture et aux ressources hydriques (SARH) qui est habilité à attribuer les droits d'utilisation de l'eau. Il est probable que les effluents des diverses municipalités devront subir une certaine forme de traitement avant d'être utilisables en agriculture. La réglementation concernant l'utilisation des eaux résiduaires sera établie en coopération par le SARH (y compris le sous-secrétariat à l'agriculture) et les ministères du développement urbain et de l'écologie, avec le soutien de l'Organisation mondiale de la Santé. Quand les eaux résiduaires ne seront pas conformes à la réglementation, le SARH exigera qu'elles soient traitées par la municipalité en cause jusqu'à l'obtention de la qualité stipulée avant de pouvoir être utilisées en remplacement d'eau pure. Le SARH fournira des avis au sujet de la technique de traitement la mieux appropriée, par l'intermédiaire d'un groupe interministériel réunissant des représentants du Ministère du développement urbain et de l'écologie et du Ministère de la santé. Une aide financière en vue du traitement des eaux résiduaires sera accordée par le ministère du développement urbain et de l'écologie.

*Source* : H. Romero, communication personnelle.

régions arides, consiste à accorder aux municipalités qui mettent en place un système d'irrigation au moyen d'eaux résiduaires le droit de puiser un volume plus important d'eau de surface ou d'eau souterraine pour le développement du réseau d'adduction (voir encadré 8.10). Des sanctions sont parfois nécessaires pour imposer aux installations municipales de traitement des eaux résiduaires le respect des normes

de qualité fixées au niveau national ; quand il n'existe aucune législation sur ce point, il faut envisager son adoption dans le cadre, plus général, de la lutte contre la pollution de l'environnement.

### **Droits d'accès**

Les agriculteurs ne manifestent aucun enthousiasme à l'idée d'installer une infrastructure d'irrigation, de construire des bassins de pisciculture, etc., s'ils ne reçoivent pas certaines garanties quant à la pérennité de leur droit d'accès aux déchets. D'un autre côté, cet accès est parfois réglementé, donnant lieu à la délivrance d'un permis qui est subordonnée à l'efficacité de l'agriculteur ou à son respect des règles d'hygiène dans l'utilisation des déchets. Au Mexique, le succès des autorités résulte pour une bonne part du pouvoir qu'elles ont de supprimer l'approvisionnement en eau aux agriculteurs qui ne respectent pas les limitations imposées à certaines cultures. D'un autre côté, au Chili, la loi sur les ressources hydriques confère le droit à l'eau aux propriétaires des terres, et les autorités sanitaires n'ont pas grand moyen de pression pour faire respecter des limitations pourtant fort justifiées (Bartone & Arlosoroff, 1987). Ainsi, une législation est parfois nécessaire pour définir les droits d'accès des usagers aux déchets ainsi que les pouvoirs des organismes habilités à attribuer ou limiter ces droits.

### **Régime foncier**

La garantie de pouvoir durablement accéder aux déchets ne présente pas grand intérêt sans sécurité de jouissance. La législation foncière en vigueur devrait suffire dans la plupart des cas, mais il est parfois nécessaire de préciser le droit à la propriété des terres vierges récemment mises en culture. Si l'on décide de regrouper les agriculteurs individuels pour les rattacher à une direction unique, il peut être nécessaire de faire adopter une loi d'expropriation.

### **Santé publique**

Relèvent de la santé publique la réglementation sur les cultures autorisées et les modes d'épandage des déchets, ainsi que les normes de qualité applicables aux excreta et aux eaux résiduaires traitées et utilisées en agriculture ou en aquaculture, points qui peuvent nécessiter des adjonctions aux règlements en vigueur. Le domaine de la santé publique englobe aussi d'autres aspects de la protection sanitaire, par exemple la médecine du travail et l'hygiène alimentaire, qui en prin-

cipe ne devraient exiger aucune nouvelle mesure. Le risque d'adopter des lois trop rigoureuses pour avoir des chances d'être respectées n'est pas moindre dans le cas de nouveaux systèmes que dans celui d'une pratique existante (voir section 8.2.2). Les facteurs qui influent sur la possibilité réelle de faire respecter les limitations imposées aux cultures (voir section 8.2.3) valent également dans le cas de nouveaux systèmes.

### **8.3.6 Relations publiques et information du public**

Le maintien de bonnes relations publiques, spécialement pour ce qui est de la protection de la santé des consommateurs, est une tâche primordiale. Il faut gagner la confiance du grand public qui doit être persuadé que les produits consommés sont parfaitement sains. Le public doit être convaincu que l'utilisation des excréta et des eaux résiduaires ne se fait pas au détriment de la santé; des garanties quant à la qualité des produits alimentaires consommés et quant à l'efficacité du traitement des excréta et des eaux résiduaires avant leur utilisation dans les champs ou dans les bassins contribuent beaucoup à mieux faire accepter ces systèmes par le grand public. A cet égard, il est essentiel de mettre en place des programmes en vue de la surveillance systématique de la qualité des excréta et des eaux résiduaires, ainsi que de celle des cultures, de même que d'apporter la preuve qu'aucune maladie associée aux excréta n'est transmise (voir section 8.5).

Le public doit être tenu informé de tout ce qui se fait en matière d'utilisation des excréta et des eaux résiduaires — que ce soit en agriculture ou en aquaculture, y compris leur utilisation pour arrosage des arbres et des espaces verts ou la mise en valeur de nouvelles terres — de façon qu'il puisse pleinement apprécier les efforts de l'administration pour améliorer le ravitaillement, sauvegarder la santé et protéger l'environnement. Le choix des médias à utiliser — par exemple la presse, les affiches ou la radio — doit se faire compte tenu des coutumes locales et des habitudes en matière de publicité car il importe que les campagnes d'information du grand public au sujet de l'utilisation des excréta et des eaux résiduaires aient un impact suffisant pour un prix raisonnable.

Les consommateurs ne sont pas forcément la cible unique des activités de relations publiques. Les usagers actuels et potentiels des déchets, de même que les propriétaires de champs ou de bassins où ces déchets seront utilisés (et leur personnel), doivent être informés des possibilités d'augmenter ainsi la production et des mesures nécessaires pour sauvegarder la santé. L'éducation pour la santé est essentielle quand

la limitation de l'exposition humaine est une des méthodes employées pour protéger la santé. Les activités de promotion et l'éducation pour la santé ont leur maximum d'efficacité lorsqu'elles sont confiées à des membres de la communauté plutôt qu'aux spécialistes des médias. Mais il faut pour cela un nombre considérable de personnes dévouées, à moins que l'opération ne puisse être confiée à un réseau d'agents communautaires déjà en place.

## **8.4 Considérations économiques et financières**

Les facteurs économiques interviennent de façon déterminante lors de l'évaluation de la viabilité d'un nouveau système d'utilisation des excreta ou des eaux résiduaires: même un projet économiquement valable peut échouer faute d'une planification financière rigoureuse. L'évaluation économique porte sur l'intérêt du projet tandis que la planification financière en étudie le mode de financement. Les perfectionnements apportés à des pratiques existantes doivent être payés d'une façon ou d'une autre, de sorte que, là aussi, un minimum de planification financière s'impose. Les deux aspects sont examinés successivement ci-dessous.

### **8.4.1 Evaluation économique**

L'évaluation économique d'un projet d'utilisation des excreta ou des eaux résiduaires est destinée à établir si, compte tenu de la situation économique du pays, ce projet mérite d'être entrepris (Squire & van der Tak, 1987; Gittinger, 1982): il s'agit donc de savoir si le pays en a les moyens. Pour cela, on calcule les coûts et les bénéfices marginaux du projet, c'est-à-dire la différence entre les coûts et bénéfices du projet et ceux d'une solution de remplacement. Pour qu'un projet soit viable, il faut que les bénéfices marginaux soient supérieurs aux coûts marginaux.

### **Eaux résiduaires**

Ce qui rend difficile l'évaluation économique des projets d'irrigation au moyen des eaux résiduaires, c'est qu'il existe toute une série de solutions de remplacement (qui pourraient être adoptées en l'absence du projet):

- suppression de toute exploitation agricole;

- suppression de toute irrigation (autrement dit pratique de la culture pluviale);
- utilisation, pour l'irrigation, d'eau provenant d'une autre source sans épandage d'engrais;
- utilisation, pour l'irrigation, d'eau provenant d'une autre source, avec épandage d'engrais.

Le bénéfice marginal procuré par l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires est différent dans chaque cas.

Quand la terre est rare, l'objectif peut être d'obtenir un bénéfice marginal maximal à l'hectare. En d'autres cas, spécialement quand la solution de remplacement envisagée est la suppression de toute exploitation agricole, la ressource rare au premier chef est l'eau et il s'agit alors de tirer le bénéfice maximum de chaque mètre cube d'eaux résiduaires utilisés. L'évaluation d'un projet déterminé implique non seulement une comparaison avec toutes les solutions de remplacement envisageables mais aussi la comparaison des différentes variantes possibles du projet — par exemple le recours à différentes techniques d'irrigation ou la production de différentes cultures.

Le coût des eaux résiduaires englobe le coût du traitement complémentaire éventuellement nécessaire (par exemple, pour assurer le respect des critères d'Engelberg) ainsi que le coût du transport des eaux jusqu'aux champs et celui de l'épandage. Mais il est essentiel de soustraire du total ainsi obtenu le coût du système d'évacuation des eaux résiduaires qui serait nécessaire si le projet n'était pas mis à exécution. Dans ces conditions, lorsque la solution de remplacement implique un certain traitement, il faut uniquement tenir compte du coût du traitement complémentaire.

Dans de nombreux cas, la solution de remplacement est coûteuse car elle implique le transport des déchets sur une longue distance ou leur rejet en mer, si bien que la réutilisation des déchets est parfois la solution la moins coûteuse pour s'en débarrasser, même sans tenir compte de la valeur de la production agricole. C'est cet argument qui justifie l'utilisation d'eaux résiduaires pour irriguer les parcs et les jardins municipaux, comme il est d'usage dans certaines villes de la région de la Méditerranée orientale et des Etats-Unis d'Amérique.

Quand la solution de remplacement est l'agriculture pluviale ou l'irrigation au moyen d'eau pure provenant d'une autre source, il faut tenir compte de la valeur des autres cultures, du rendement, et du coût des engrais éventuellement nécessaires. Un avantage particulier de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires est qu'elle permet d'écono-

miser le coût du captage de l'eau pure dont on se servirait à défaut de cette solution — et l'avantage est encore plus net quand cette eau est précieuse pour d'autres usages, par exemple l'approvisionnement des particuliers ou des industriels. Malheureusement, il est fréquent qu'on manque de données pour calculer la totalité des coûts et des bénéfices associés à la solution de remplacement; on se trouve obligé de comparer l'utilisation des eaux résiduaires avec la solution qui consiste soit à renoncer entièrement à l'irrigation ou, plus couramment, à s'abstenir de toute exploitation agricole.

L'évaluation économique part de l'idée que le coût réel et la valeur réelle d'une activité ou d'une installation pour l'économie du pays n'est pas toujours identique au prix payé correspondant. Par exemple, les devises étrangères peuvent être plus précieuses que ne l'indique le taux de change officiel, arbitrairement fixé. A l'inverse, l'emploi de travailleurs qui seraient autrement au chômage revient moins cher, pour l'économie, que le montant des salaires versés puisqu'aucune production n'est perdue par ailleurs du fait de l'emploi qui leur est proposé. Les économistes se servent de «prix de référence» (ou «prix virtuel») pour obtenir la valeur «réelle» approximative d'une activité ou d'une installation pour l'économie nationale. Par exemple, le prix virtuel des devises étrangères est généralement plus élevé que le prix réel payé, tandis que c'est l'inverse qui est vrai pour la main-d'œuvre non qualifiée.

L'emploi des prix de référence est particulièrement important pour l'évaluation économique des systèmes d'utilisation des eaux résiduaires et, en général, il leur est favorable pour au moins deux raisons. Tout d'abord, le procédé de traitement qui convient le mieux pour les eaux résiduaires destinées à l'irrigation (le procédé des bassins de stabilisation) fait appel à des installations qui peuvent être construites par des méthodes à fort coefficient de main-d'œuvre et nécessitent moins de matériel importé que les autres procédés; estimé au prix virtuel, leur prix de revient a de fortes chances d'être moins élevé. En second lieu, le cours de bon nombre de plantes dont la culture est envisageable (par exemple des céréales, des oléagineux ou du coton) est souvent maintenu au-dessous des cours pratiqués sur le marché mondial. Que ces cultures soient destinées à l'exportation ou au remplacement d'importations, l'adoption d'un prix virtuel pour les devises étrangères en révélera la valeur réelle pour l'économie.

## **Excreta**

Les méthodes d'évaluation économique de l'utilisation des excreta sont moins élaborées que dans le cas de l'irrigation au moyen d'eaux rési-

duaires car certains des bénéfiques — par exemple l'amélioration de la structure du sol, sont beaucoup plus difficiles à chiffrer. La solution de remplacement adoptée consiste dans la renonciation totale à l'utilisation d'engrais de sorte qu'un système d'utilisation des excreta n'est jugé économiquement viable que si la valeur de l'avantage marginal résultant (augmentation des rendements) est supérieure au coût du traitement, du transport et de l'épandage de ces excreta.

## **Aquaculture**

La comparaison peut se faire avec deux solutions de remplacement :

- renonciation totale à l'aquaculture;
- pratique de l'aquaculture avec une autre source d'engrais pour les bassins.

L'évaluation économique se pose donc en termes comparables à ceux de l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires, et le rapport coût-avantage est jugé viable si la valeur marginale de la production de poissons ou de plantes aquatiques est supérieure au coût du traitement et du transport des excreta ou des eaux résiduaires utilisés pour la production.

### **8.4.2 Planification financière**

#### **Prélèvement d'une taxe pour la fourniture de déchets**

Quand les eaux résiduaires sont réparties par un organisme différent de celui qui en assure la collecte et le traitement, elles donnent normalement lieu au prélèvement d'une taxe. Une taxe est aussi prélevée quand les déchets sont distribués à des agriculteurs indépendants.

Le montant des taxes doit être fixé au stade de la planification (voir encadré 8.11). Les pouvoirs publics doivent décider si le montant des taxes doit couvrir uniquement les frais d'exploitation et d'entretien ou, en plus, les dépenses d'investissement consacrées au système. Il est certes souhaitable de récupérer au maximum les coûts supportés, mais une considération importante en la matière est d'éviter de décourager les agriculteurs d'utiliser les déchets comme cela leur est permis. Une enquête préliminaire sur la volonté et la capacité de payer la taxe est donc essentielle, non seulement pour en établir le montant mais aussi pour déterminer la fréquence, le calendrier et les modalités des versements. Par exemple, une taxe annuelle payable après la saison des récoltes est sans doute la plus facile à prélever.

## Encadré 8.11 Réutilisation des eaux résiduaires à Trujillo (Pérou)

La ville de Trujillo compte 400 000 habitants et se situe sur la partie aride du littoral péruvien, à cheval sur le nord et le centre. Un réseau d'égouts dessert près de 90% de la population et déverse ses effluents directement sur la plage, à la limite septentrionale de la zone urbanisée. Cependant, des eaux résiduaires sont prélevées en plusieurs points pour l'irrigation de la canne à sucre ou des cultures fourragères, conformément à l'autorisation accordée, tandis que des dérivations clandestines sont pratiquées en plusieurs autres points par les agriculteurs locaux, pour l'irrigation de cultures vivrières. Dans certains cas, les agriculteurs ont construit des systèmes rudimentaires de bassins pour traiter les eaux résiduaires afin d'obtenir un permis, mais, en réalité, il s'agit seulement de bassins de décantation anaérobies peu profonds, comportant une durée de rétention de l'ordre d'un jour. La demande économique d'eau d'irrigation est importante car les précipitations annuelles sont quasi nulles et la rivière voisine à sec pendant sept mois de l'année. De vastes étendues de désert stérile entourent la ville alors qu'elles pourraient être mises en exploitation si l'on disposait d'eau.

Dans le cadre d'une étude de faisabilité réalisée pour le service national de l'eau et des égouts avec le soutien financier d'un organisme allemand (la *Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*), on a étudié le système d'irrigation au moyen d'effluents dont la construction est envisagée. Sur une superficie totale de 2 100 ha de terres irrigables, on a constaté que 1 300 ha seulement pourraient être irrigués tout au long de l'année avec le volume d'eaux résiduaires disponible (environ 20,5 millions de mètres cubes par an en 1990). En subdivisant le réseau d'égouts existant en zones de micro-drainage, on a pu repérer huit points du réseau où l'on pourrait détourner des eaux résiduaires en vue d'une irrigation par gravité, après traitement dans des bassins de stabilisation conçus en conséquence. Les caractéristiques chimiques des eaux résiduaires ne soulèvent aucun problème dans l'optique de leur utilisation pour l'irrigation, de sorte que le principal souci est d'en éliminer les agents pathogènes, ce qui peut se faire dans de bonnes conditions avec des bassins à plusieurs compartiments.

L'analyse financière du système de réutilisation proposé, avec ou sans traitement, a montré que l'irrigation au moyen d'eaux résiduaires traitées n'est praticable que si les frais du traitement sont équitablement répartis entre les principaux bénéficiaires, à savoir la municipalité, qui est obligée de se débarrasser des eaux résiduaires dans des conditions hygiéniques, et les agriculteurs qui ont besoin pour l'irrigation d'une eau de qualité suffisante. Le mode de répartition recommandé à Trujillo a été de faire supporter les coûts de construction par la municipalité et le coût du terrain ainsi que les dépenses d'exploitation et d'entretien par les agriculteurs. Une enquête auprès des agriculteurs locaux a montré qu'ils étaient d'accord pour supporter les coûts selon ce mode de répartition, sous forme soit d'une taxe, soit d'une contribution en nature (terres ou main-d'œuvre) — décision qui se comprend lorsqu'on sait que certains agriculteurs utilisaient alors des eaux souterraines pour un prix environ deux fois plus élevé que celui qu'on leur facturait pour l'utilisation des eaux résiduaires traitées. Moyennant cette formule, le projet de réutilisation est financièrement viable.

Cet exemple montre bien que les agriculteurs locaux sont souvent prêts à

**(Encadré 8.11 suite)**

payer les effluents utilisés pour l'irrigation et ont les moyens de le faire, mais qu'il ne faut pas attendre d'eux qu'ils déchargent la municipalité des frais qui lui incombent normalement pour l'élimination des déchets.

Source : Rojas et al. (1985).

Il est parfois possible, et souvent rentable, de susciter une demande accrue de déchets grâce à une promotion efficace. Mais il ne faut pas anticiper sur les résultats d'une campagne de promotion au moment où l'on fixe le montant initial des taxes, lequel pourra être augmenté peu à peu parallèlement à la progression de la demande.

D'un autre côté, les agriculteurs acceptent parfois de supporter une part des investissements nécessaires pour construire les installations de traitement indispensables à l'obtention d'un permis de réutilisation. Cette contribution peut se faire en espèces ou par l'octroi de terrains pour les installations de traitement ou d'entreposage. En outre, l'expérience du Pérou montre que les agriculteurs acceptent parfois d'exécuter certaines tâches associées à l'exploitation et à l'entretien des installations de traitement, d'entreposage et de transport des déchets, sous forme d'une contribution en nature qui diminue d'autant les dépenses de fonctionnement du système (Bartone & Arlosoroff, 1987).

Un agriculteur ne paie les eaux résiduaires destinées à l'irrigation que si le coût correspondant est inférieur à celui de la solution la moins coûteuse pour se procurer de l'eau, majoré de la valeur des éléments nutritifs contenus. Cela étant, comment l'organisme qui vend les eaux résiduaires aux agriculteurs doit-il en établir le coût? Il existe pour cela trois méthodes principales. Le prix fixé peut être établi sur la base:

- des coûts de production (traitement complémentaire et transport);
- des bénéfices tirés de l'irrigation;
- des jugements de valeur concernant la capacité ou la volonté des agriculteurs d'apporter leur contribution financière.

Si l'on retient la première solution, elle doit être assortie d'une réserve, à savoir que le coût ne doit pas être supérieur à celui de la source de remplacement la moins onéreuse dont disposent les agriculteurs (en général des eaux souterraines). On peut tenir compte ou non de la valeur des nutriments contenus dans les eaux résiduaires.

Dans le cas de l'aquaculture et de l'utilisation d'excreta en agriculture, le coût des excreta ou des eaux résiduaires est généralement éta-

bli sur la base du coût marginal du traitement ou du transport ou, si elle est plus faible, sur la base de la valeur des éléments nutritifs contenus (en général de l'azote). La taxation peut se faire selon diverses modalités, par exemple :

- au mètre cube (ou à la tonne, pour les excreta);
- à l'heure de distribution à partir d'une vanne classique;
- à l'hectare de terre irriguée ou amendée.

Le paiement de la taxe peut également se faire de diverses façons :

- sous forme d'une taxe ou d'un prix d'achat correspondant au volume d'eau utilisé;
- sous forme d'une taxe prélevée lors du renouvellement du permis de captage;
- comme surtaxe sur le prix de location des terres;
- en déduction du prix de vente des récoltes, dans l'hypothèse de leur commercialisation par un organisme central.

Un problème particulier qui doit être envisagé est celui de la responsabilité engagée et des compensations à prévoir lorsque, pour une raison ou une autre (par exemple une panne à la station de traitement), les déchets ne présentent pas la qualité exigée ou convenue. Il sera difficile d'empêcher les agriculteurs d'utiliser quand même les déchets, spécialement si l'accident se produit à une époque où la demande est maximale et où l'absence d'eau ou d'engrais risquerait de compromettre gravement la croissance végétale. Le plus simple est sans doute de renoncer à prélever la taxe tant que les déchets ne retrouvent pas leur qualité normale. Les intéressés doivent évidemment être informés du problème et des risques qui en découlent pour la santé, tandis qu'on prendra toutes les mesures temporaires possibles pour limiter au minimum ces risques en attendant que la qualité normale soit rétablie.

### **Paiement pour la protection de la santé**

Il n'est pas toujours satisfaisant, ou faisable, de couvrir le coût des mesures de protection de la santé en facturant l'utilisation des déchets.

Les considérations financières concernant chacun des quatre principaux types de mesures de protection de la santé sont examinées ci-dessous.

a) *Traitement*

**Eaux résiduaires.** La construction des installations de traitement des eaux résiduaires revient cher ; les investissements importants nécessaires dépassent la capacité financière de la plupart des municipalités des pays en développement, si bien que, en général, ils sont financés par des subventions ou des prêts de l'administration centrale, de même que les réseaux d'égouts. D'un autre côté, les dépenses de fonctionnement peuvent en général être couvertes par une taxe municipale ou par les sommes encaissées pour la fourniture d'eau. Le coût du traitement est habituellement justifié par le souci de lutter contre la pollution du milieu.

Mais le traitement des eaux résiduaires jusqu'à obtention d'une qualité suffisante pour qu'elle soit utilisable en agriculture peut entraîner des dépenses supplémentaires, au titre de la construction ou de l'entretien. Certaines de ces dépenses peuvent être couvertes par la vente des eaux résiduaires traitées ou par le prélèvement d'une taxe lors de la délivrance d'un permis d'utilisation. Mais, en pratique, le tarif et le montant des taxes sont souvent établis compte tenu des sommes que les agriculteurs sont prêts à payer. En pareil cas, la différence peut être considérée comme une subvention accordée par les pouvoirs publics aux agriculteurs afin de promouvoir l'utilisation des eaux résiduaires. Il est courant, en pratique, que l'eau d'irrigation soit fournie aux agriculteurs à un prix de faveur.

**Excreta.** Les investissements relatifs au traitement des gadoues peuvent être modiques et le coût du traitement peut, au moins en partie, être récupéré par la vente des gadoues traitées. En principe, il s'agit principalement de dépenses de fonctionnement répétitives, relativement faibles par rapport au coût de ramassage des excreta bruts. Si la valeur marchande du produit traité est faible, le solde des dépenses de traitement peut être imputé sur le budget du service de ramassage des gadoues. Cette solution représente même parfois une économie par rapport au coût plus élevé qu'il faudrait supporter autrement pour se débarrasser des excreta non traités. Quand le compostage des excreta se fait en même temps que celui des ordures ménagères, l'économie réalisée sur le coût de l'évacuation des déchets solides peut être considérable.

Si l'on veut inciter les agriculteurs à traiter les gadoues ou les eaux

résiduaire, par exemple en construisant une citerne de stockage des gadoues ou, dans le cas de l'aquaculture, en créant un compartiment séparé dans un bassin de pisciculture, il faut parfois les aider en leur fournissant les crédits nécessaires pour couvrir le coût de la construction. On peut utiliser à cette fin le système de crédit agricole déjà en place s'il est à même d'accorder une priorité particulière aux agriculteurs qui réutilisent les déchets.

#### *b) Limitation à certaines cultures*

Souvent, la limitation à certaines cultures de l'usage des déchets pour l'irrigation va à l'encontre des forces du marché, même si elle est justifiée pour protéger la santé; les salades, par exemple, sont souvent plus rentables que les cultures industrielles. De ce fait, l'agriculteur qui se plie à la réglementation qui en interdit l'usage dans ce cas encaisse un moindre bénéfice que celui qui passe outre. La différence de profit représente le coût du respect de la réglementation. Dans une certaine mesure, ce coût est la conséquence de la distorsion du marché car les cours de cultures moins dangereuses pour la santé (par exemple le coton, les céréales et les oléagineux) sont souvent maintenus artificiellement à un faible niveau par les pouvoirs publics ou les organismes de commercialisation. Si les cours n'étaient pas réglementés et s'établissaient, par exemple, comme ils le font sur le marché mondial, certaines de ces cultures pourraient être presque aussi rentables que les cultures interdites par la réglementation. Elles peuvent être aussi précieuses pour l'économie nationale bien que les exploitants agricoles soient moins bien rétribués pour leur production. En pareil cas, il serait parfaitement rationnel pour les pouvoirs publics de subventionner l'utilisation des déchets quand elle donne lieu à certaines limitations, dans le but de corriger ainsi la distorsion des prix.

Mais, en général, il n'est pas possible de verser cette subvention sous forme d'une élévation des cours pour les cultures autorisées. L'adoption de deux prix différents (un prix subventionné pour les plantes cultivées au moyen des déchets et un prix plus faible dans les autres cas) ouvrirait la porte aux abus; d'un autre côté, il n'est pas simple de mettre fin aux distorsions de prix existantes qui ont des répercussions sur l'ensemble du pays. Il est plus facile de verser la subvention sous forme d'un soutien accordé par les pouvoirs publics en faveur d'autres mesures, en particulier des mesures de protection sanitaire impliquant le traitement et l'épandage des déchets et la limitation de l'exposition humaine.

Quoi qu'il en soit, ces autres formes de subvention ne font pas disparaître l'incitation que constitue le niveau des cours pour l'agricul-

teur non respectueux des limitations. L'application du règlement doit être rendue effective et, là encore, ce n'est pas gratuit. En principe, le soin de faire appliquer le règlement est confié à l'organisme qui délivre le permis d'utilisation des déchets (souvent le ministère de l'agriculture) ou aux fonctionnaires locaux du ministère de la santé. Dans les deux cas, ce n'est, pour ce personnel, qu'une tâche parmi tant d'autres, de sorte que le coût est généralement englobé dans le budget qui couvre les salaires du personnel, les transports, etc. Mais ce n'est pas une raison pour négliger les frais qu'entraîne la mise en place d'un système efficace pour faire respecter le règlement. Parfois, la limitation de l'emploi des déchets à certaines cultures permet de diminuer les sommes consacrées à leur traitement, mais cette mesure n'est efficace que si l'on prévoit un budget suffisant pour la faire respecter.

#### c) *Epandage*

L'irrigation par aspersion qui, en principe, provoque une contamination plus large que les autres méthodes de réutilisation des eaux résiduaires, exige en général une préparation du sol moins poussée qu'avec l'irrigation superficielle. Si l'on opte pour l'irrigation superficielle ou l'irrigation souterraine afin de réduire la contamination au minimum, il est souvent plus facile et moins onéreux de confier la préparation du sol à un organisme central plutôt qu'aux divers exploitants individuels. Une autre solution consiste à aider les exploitants en leur prêtant le matériel nécessaire ou en leur donnant la possibilité de le louer. Comme la préparation des champs permet aux agriculteurs d'éviter d'autres dépenses, le coût peut être récupéré auprès d'eux de la même façon que les autres dépenses d'irrigation — par l'intermédiaire des loyers des terres, le prélèvement des taxes sur l'eau ou les droits sur les permis d'irrigation. Comme l'irrigation localisée consomme moins d'eau et permet des rendements plus élevés, les agriculteurs eux-mêmes peuvent trouver avantageux d'adopter cette méthode.

#### d) *Limitation de l'exposition humaine*

L'achat de vêtements protecteurs est normalement à la charge des ouvriers qui les portent ou de leurs employeurs.

On pourrait éventuellement facturer aux gros employeurs le coût du traitement régulier des helminthiases, par exemple en prélevant une surtaxe sur les permis d'utilisation des eaux résiduaires. Mais, si le traitement est assuré par le service national de santé, le remboursement au ministère de la santé du coût du traitement à l'aide du produit d'une taxe qui est versée à un autre organisme risque de consti-

tuer une procédure complexe. Il n'est pas conseillé de mettre le traitement à la charge des exploitants car il faut que la chimiothérapie soit gratuite si l'on veut parvenir à une couverture totale. Le plus commode est donc sans doute de faire supporter le coût correspondant par le budget ordinaire du service de santé.

## 8.5 Surveillance et évaluation

Les mesures de protection sanitaire qui sont adoptées dans un système donné de réutilisation des déchets constituent un ensemble complexe qui doit faire l'objet d'une surveillance constante si l'on veut qu'il continue à bien fonctionner. Mais, la surveillance, c'est-à-dire l'observation, l'inspection et la collecte d'échantillons en vue de leur analyse, ne suffit pas en soi. Il faut prévoir des mécanismes institutionnels qui permettent de répercuter les données ainsi recueillies à ceux qui sont chargés d'appliquer les mesures de protection sanitaire. En d'autres termes, il faut répondre par avance aux questions suivantes :

- a) Quelles seront les données recueillies?
- b) Selon quelle fréquence et par qui?
- c) A qui ces résultats de la surveillance seront-ils communiqués?
- d) Quelles seront les décisions prises sur la base des données fournies par la surveillance?
- e) Qui sera habilité à faire appliquer effectivement les décisions prises?

Pour répondre à la question d), il faut disposer d'une série de normes ou valeurs indicatives auxquelles on puisse comparer les résultats de la surveillance. La question e) appelle deux types de réponses. Tout d'abord, dans le cas de la surveillance par un organisme d'exécution (par exemple un comité municipal des effluents), les personnes qui interprètent les données fournies par la surveillance peuvent purement et simplement donner l'ordre à leurs subordonnés de prendre les mesures correctives éventuellement nécessaires. En second lieu, quand la surveillance relève d'un organisme de tutelle (par exemple le ministère de la santé), ce dernier est habilité par la loi à imposer le respect des normes de qualité et des autres textes législatifs. Un système complet de surveillance et de contrôle nécessite par conséquent :

- la définition de normes ou de valeurs indicatives;

- des activités de surveillance ou de contrôle pour vérifier que la réglementation est respectée;
- des mécanismes institutionnels assurant la communication d'informations en retour ou l'application effective de la réglementation.

Il faut bien préciser, dès le début, à qui incombe le soin de surveiller l'application des mesures de protection sanitaire si l'on veut éviter les négligences. Une surveillance et une évaluation régulières font intervenir les éléments suivants:

- mise en œuvre des mesures elles-mêmes;
- qualité microbiologique des déchets;
- qualité microbiologique des cultures;
- surveillance des maladies au sein des groupes exposés.

### **Mise en œuvre des mesures**

Dans bien des cas, la principale mesure de protection sanitaire consiste dans le traitement des déchets de façon à obtenir une qualité suffisante (voir ci-après). La mise en œuvre des autres mesures peut être surveillée par voie d'enquêtes, conformément à la méthode indiquée à la section 8.2.1 pour les pratiques existantes. Ces enquêtes doivent être plus fréquentes au cours des premiers mois de fonctionnement d'un nouveau système, la fréquence pouvant être progressivement ramenée à une ou deux enquêtes par an dès lors que les difficultés éventuelles rencontrées au départ ont été aplanies.

### **Qualité des déchets**

Pour ce qui est de la qualité des déchets, il peut être plus avantageux de surveiller le fonctionnement du système de traitement que d'effectuer de fréquents prélèvements après traitement, en vue d'une analyse microbiologique, car les analyses peuvent être délicates, longues et coûteuses. La charge hydraulique d'une série de bassins de stabilisation, par exemple, est relativement facile à surveiller et peut immédiatement expliquer toute dégradation de la qualité de l'effluent, inexplicable par les seuls résultats des analyses microbiologiques.

En particulier, les valeurs indicatives recommandées à Engelberg

ne sont pas des normes de surveillance de la qualité mais des paramètres nominaux à utiliser lors de la conception d'un système de traitement.

Néanmoins, l'organisme responsable de la gestion d'une grande installation de traitement des gadoues ou des eaux résiduaires doit contrôler régulièrement la qualité microbiologique des déchets traités, ou au moins leur teneur en coliformes fécaux. Mais, bien souvent, le seul organisme qui dispose des moyens de laboratoire nécessaires à un examen microbiologique complet est le ministère de la santé ou l'administration sanitaire locale. Qu'il effectue ou non les épreuves de laboratoire pour le compte de l'organisme de traitement des déchets, le ministère de la santé est généralement le mieux placé pour assurer une surveillance globale de la qualité des déchets utilisés en agriculture et en aquaculture. Aux fins de la surveillance, les échantillons doivent être recueillis et examinés par l'organisme officiel compétent de façon que les résultats soient correctement interprétés.

Etant donné que les nématodes intestinaux constituent un risque majeur pour la santé et que leurs œufs persistent plus longtemps dans l'environnement que les bactéries fécales, l'idéal serait que les examens de laboratoire comportent une épreuve de dosage des œufs de nématodes intestinaux. Malheureusement, les techniques de laboratoire utilisées à cette fin en sont encore au stade expérimental.

Les échantillons doivent être recueillis aseptiquement et examinés dans les 6 heures. En attendant l'examen bactériologique, ils doivent être conservés à environ 4 °C, par exemple sur un lit de glace dans une glacière isolée. Quand l'effluent a été désinfecté au chlore, il faut immédiatement déchlorer les échantillons et prendre des précautions particulières pour empêcher que les bactéries ne se remettent à pousser. Bien souvent, il est plus commode de réaliser les analyses sur place que de transporter les échantillons jusqu'à un laboratoire. Les échantillons doivent de préférence être recueillis par le personnel du laboratoire où ils seront examinés. Quand c'est impossible, il faut particulièrement veiller à bien identifier les échantillons et à les présenter correctement; on trouvera par ailleurs des précisions sur les méthodes d'analyse bactériologique (American Public Health Association, 1985). Une méthode simplifiée est décrite dans l'encadré 8.12 pour l'analyse des coliformes fécaux.

L'encadré 8.13 indique une méthode utilisable pour compter les œufs de nématode dans des échantillons d'eaux résiduaires; dans le cas d'échantillons d'excreta, on peut se servir de la méthode au formol-soluté physiologique-éther (Cheesbrough & McArthur, 1976). A noter que les œufs de nématodes sont généralement éliminés, mais non tués, par la sédimentation lors du traitement des eaux résiduaires alors que, lors du traitement des excreta, ils sont généralement tués mais non

éliminés. Il est donc inutile, quand on examine des eaux résiduaires, de s'assurer que les œufs sont ou non viables, alors que c'est le principal souci quand on examine un échantillon d'excreta.

Les échantillons d'eaux résiduaires et d'excreta traités doivent faire l'objet, au moins une fois par mois, d'une analyse physicochimique — pH, conductivité électrique, taux d'adsorption du sodium, nutriments (N, P, K) et bore — mais cette fréquence peut être réduite si l'expérience montre que les variations de qualité sont faibles. L'analyse doit inclure les métaux lourds quand les eaux résiduaires contiennent une forte proportion de déchets industriels.

Les grands systèmes d'utilisation d'excreta ou d'eaux résiduaires peuvent avoir intérêt à disposer de leur propre laboratoire pour ces analyses, mais, en général on peut avoir recours à des laboratoires existants.

### Encadré 8.12 Dosage simplifié des coliformes fécaux

Le but de la méthode est de voir si les eaux résiduaires satisfont ou non à la recommandation d'Engelberg, à savoir 1 000 coliformes fécaux pour 100 ml, dans le cas d'eaux résiduaires utilisables pour l'irrigation sans limitation.

Travailler dans les conditions normales d'asepsie. Préparer une dilution au 10<sup>e</sup> en versant 1 ml de l'échantillon d'eaux résiduaires dans 9 ml d'une solution de chlorure de sodium à 8,5 g/l (0,85%). Ajouter 1 ml d'échantillon dilué dans chacun des tubes d'une série de cinq tubes contenant 5 ml de milieu A-1<sup>e</sup> ainsi que dans un tube de Durham. Faire incuber à 44,5 °C pendant 19-23 h. Compter le nombre de tubes positifs (ceux où l'on observe une production de gaz) et déterminer le nombre le plus probable (NPP) de coliformes fécaux pour 100 ml d'eaux résiduaires, à partir du tableau ci-dessous.

Nombre de tubes positifs	NPP de coliformes fécaux pour 100 ml
0	< 220
1	220
2	510
3	920
4	1 600
5	> 1 600

Utiliser la même méthode pour les échantillons de gadoues traitées. Agiter énergiquement l'échantillon et verser 1 ml (ou 1 g) dans un flacon à bouchon vissé contenant 9 ml de diluant et quelques billes de verre. Agiter énergiquement l'échantillon dilué avant de le verser dans les tubes contenant le milieu A-1.

<sup>e</sup> Composition : 5 g de lactose, 20 g de tryptone, 5 g de NaCl, 1 ml de Triton X-100, 1 litre d'eau distillée (American Public Health Association, 1985).

Les hôpitaux locaux disposent le plus souvent des moyens nécessaires pour l'examen microbiologique, tandis que les analyses chimiques peuvent être confiées aux installations locales de traitement des eaux résiduaires, aux écoles ou universités — encore qu'il faille, pour certaines analyses, expédier les échantillons à un laboratoire central. Cependant, l'absence des moyens de laboratoire locaux nécessaires pour la surveillance de la qualité ne constitue pas une raison suffisante pour qu'on renonce à utiliser les déchets.

### **Qualité des cultures**

*A priori*, la surveillance de la qualité microbiologique des cultures incombe aussi au ministère de la santé puisqu'il est chargé de faire respecter les règlements en vigueur en matière de santé publique. Quand il s'agit de cultures fourragères, cette tâche inclut l'inspection des carcasses d'animaux alimentés à l'aide de ces fourrages (en stabulation ou en pacage) à la recherche du ténia du bœuf ou du porc. L'inspection doit porter sur *toutes* les carcasses et non uniquement sur un échantillon. Toutes les carcasses infectées doivent être éliminées.

### **Surveillance des maladies**

La surveillance des maladies doit concerner avant tout les ouvriers agricoles qui constituent le groupe le plus exposé aux infections lors de l'utilisation d'eaux résiduaires ou d'excreta. La forme la plus simple de surveillance, qui constitue le minimum à exiger dans n'importe quel système de réutilisation des déchets, consiste dans un examen coprologique régulier par sondage, à la recherche de parasites intestinaux. Mieux vaudrait le faire à une époque déterminée de l'année car plusieurs de ces parasitoses ont une prévalence et une intensité qui présentent des variations saisonnières. Si l'on pratique une chimiothérapie, il est commode de procéder à l'enquête juste avant la série annuelle de traitements.

La surveillance des maladies diarrhéiques soulève davantage de difficultés; de préférence, elle doit porter sur des agents pathogènes bien déterminés, encore que ce ne soit pas facile. L'examen bactériologique des selles est coûteux et ne donne pas toujours des résultats très cohérents. Mais, là où la typhoïde est endémique, une enquête sérologique au moyen de l'épreuve de Widal (Cheesbrough & McArthur, 1976) serait relativement facile à pratiquer parallèlement à la collecte d'échantillons de selles pour l'enquête parasitologique.

## Encadré 8.13 Dénombrement des œufs d'helminthes dans les eaux résiduaires

Méthode de la flottation par centrifugation, adaptée de Teichmann (1986).

### Mode opératoire

1. On prélève en une seule fois, à chaque site d'échantillonnage et à une heure déterminée de la journée, un échantillon d'au moins 1 litre d'eaux résiduaires qui est envoyé au laboratoire.
2. Au laboratoire, placer chaque échantillon dans un bécher de 1 litre (diamètre de 15 cm) et laisser décanter pendant 8 heures. La décantation s'achève pendant la nuit et l'analyse peut reprendre le lendemain.
3. Après décantation, éliminer le surnageant à l'aide d'une trompe à eau.
4. Transvaser le culot dans un tube à centrifuger de 20 ml (à raison de 3 ml au maximum par tube). Nettoyer soigneusement les parois du bécher utilisé pour la décantation avec une pissette et ajouter l'eau de rinçage au culot, dans les tubes à centrifuger. Centrifuger ensuite pendant 10 minutes à 700 g puis éliminer le surnageant.
5. Dans chaque tube, ajouter au sédiment 3 ml d'une solution de  $\text{NaNO}_3$  (à 500 g/l). Cette solution doit avoir une densité de 1,3 (*Remarque*: si la densité est trop faible, la flottation par centrifugation fonctionne mal, certains œufs ne flottant pas à la surface).
6. Après addition de  $\text{NaNO}_3$ , mettre la centrifugeuse en marche pendant 3 minutes à 1 000 g.
7. Retirer soigneusement le surnageant (qui contient maintenant les œufs d'helminthes) et l'introduire dans un bécher de 1 litre (15 cm de diamètre) contenant un peu moins de 1 litre d'eau pure. (L'eau dilue le nitrate de sodium de sorte que les œufs viennent se déposer au fond du bécher).
8. Ajouter de nouveau 3 ml de  $\text{NaNO}_3$  au sédiment de chaque tube et centrifuger les tubes à 1 000 g pendant 3 minutes. Retirer soigneusement le surnageant et le transvaser dans le bécher de 1 litre contenant le premier surnageant.
9. Recommencer l'opération décrite sous 8, (de façon que le sédiment soit centrifugé avec le nitrate de sodium trois fois au total).
10. Laisser reposer le bécher contenant tous les surnageants dilués dans l'eau pendant plusieurs heures pour que tous les œufs d'helminthes décanter.
11. Retirer avec soin le surnageant de ce bécher et le jeter. Transvaser le sédiment dans les tubes à centrifuger. Bien nettoyer les parois du bécher

**(Encadré 8.13 suite)**

de sédimentation à la pissette et ajouter l'eau de rinçage au sédiment dans les tubes à centrifuger. Mettre la centrifugeuse en marche pendant 4 minutes à 1 000 g.

12. Placer le produit final de la centrifugation sur une lame et l'examiner au microscope. On pourra l'éclaircir à l'huile de paraffine après évaporation de l'eau. Le dénombrement des œufs d'helminthes se fait sous un grossissement de  $\times 100$ .

**Variantes**

- Au lieu de recueillir la totalité des surnageants provenant de la centrifugation en nitrate de sodium dans un bécher rempli d'eau en vue d'une nouvelle sédimentation, on peut filtrer l'ensemble des surnageants obtenus lors des trois opérations de centrifugation (étapes 6 à 9) et les filtrer sur une membrane (ayant des pores d'un diamètre de 10  $\mu\text{m}$ ). Les filtres peuvent être séchés à l'air puis inclus dans un baume neutre placé sur une lame, ou être directement examinés en vue du dénombrement des œufs. Le recours à la filtration sur membrane est une méthode probablement plus simple et plus efficace, mais également plus coûteuse que la méthode indiquée plus haut.
- Lors des étapes 2 et 7, on peut remplacer le bécher de 1 litre par un erlenmeyer de capacité identique. Cela facilite la décantation et permet parfois de récupérer un plus grand nombre d'œufs. On peut envisager d'utiliser plusieurs petits erlens (comme ceux qu'on utilise pour recueillir les urines).
- A défaut de nitrate de sodium, on peut essayer d'utiliser du sulfate de magnésium, de densité voisine. Mais le pourcentage de récupération avec  $\text{MgSO}_4$  n'a jamais été évalué.

**Taux de récupération**

Avec cette méthode, le taux de récupération est d'environ 70% lorsque la densité des œufs est de 100 par litre. Quand la densité diminue, il en va de même pour le taux de récupération. Pour 10 œufs par litre, ce taux est de l'ordre de 50% et pour 1 œuf par litre, il tombe à 33%.

Les considérations épidémiologiques (taille de l'échantillon, aspects éthiques, interprétation des résultats, etc.) qui s'appliquent à la surveillance des maladies sont à peu près les mêmes que celles qui régissent une enquête épidémiologique (voir encadré 8.3). Il faut qu'un épidémiologiste et un statisticien participent à la planification du programme de surveillance et soient en outre consultés lorsqu'un nombre excessif de cas paraît se manifester dans certains groupes exposés.

# Références

- ANON. Processing sludge and manure. *Biocycle*, 27(2): 30-31 (1986).
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 16<sup>e</sup> éd. New York, American Public Health Association, 1985.
- ARTHUR, J.P. *Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries*. Washington, DC, Banque mondiale, 1983 (Technical Paper N° 7).
- AYERS, R. S. & WESTCOT, D. W. *Water quality for agriculture*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1984 (Irrigation and Drainage Paper N° 29, Rev. 1). Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
- BARTONE, C. R. ET AL. *Monitoring and maintenance of treated water quality in the San Juan lagoons supporting aquaculture*. Lima, Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, 1985.
- BARTONE, C. R. & ARLOSOROFF, S. Reuse of pond effluents in developing countries. *Water science and technology*, 19 (12): 289-297 (1987).
- BLUM, D. & FEACHEM, R. G. *Health aspects of nightsoil and sludge use in agriculture and aquaculture. Part III: An epidemiological perspective*. Dübendorf, International Reference Centre for Waste Disposal, 1985 (Report N° 05/85).
- BOSE, P. C. Calcutta sewage and fish culture. *Proceedings of the National Institute of Sciences of India*, 10(4): 443-454 (1944).
- BURAS, N. ET AL. Microbiological aspects of fish grown in treated wastewater. *Water research*, 21:1-10 (1987).
- CACERES, A. CACERES, R. *Control sanitario de bio-anobos y efluentes de letrinas secas familiares y digestores de biogas*. Document non publié présenté au XIII<sup>e</sup> Congrès Centre américain de Génie sanitaire et écologique, Guatemala, Guatemala, 16-20 mars 1981.
- CALIFORNIA STATE DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH. *Statewide standards for the safe direct use of reclaimed wastewater for irrigation and recreational impoundments*. Berkeley, California State Department of Public Health, 1968 (California Administrative Code, Title 17 — Public Health).
- CAMP SCOTT FURPHY PTY LTD. *Werribee treatment complex development strategy. Stage 1 Report - Report to the Melbourne and Metropolitan Board of Works*. Melbourne, Camp Scott Furphy, Pty, Ltd, 1986.

- CENTRE DES NATIONS UNIES POUR LES ÉTABLISSEMENTS HUMAINS. *The design of shallow sewer systems*. Nairobi, Centre des Nations Unies pour les établissements humains, 1987.
- CENTRE DE RÉFÉRENCE POUR L'ÉVACUATION DES DÉCHETS. Health aspects of wastewater and excreta use in agriculture and aquaculture: the Engelberg report. *IRCWD news*, **23**: 11-18 (1985).
- CHAO, K. *Agricultural production in communist China (1949-1965)*. Madison, University of Wisconsin Press, 1970.
- CHAMBERS, C. W. Chlorination for control of bacteria and viruses in treatment plant effluents. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, **43**: 228-241 (1971).
- CHEESBROUGH, M. & McARTHUR, J. *A laboratory manual for rural tropical hospitals*. Edimbourg, Churchill Livingstone, 1976.
- CROSS, P. *Health aspects of nightsoil and sludge use in agriculture and aquaculture. Part I: Existing practices and beliefs in the utilization of human excreta*. Dübendorf, International Reference Centre for Waste Disposal, 1985 (report N° 04/85).
- CONSEIL DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES. Directive du Conseil 76/160/EEE du 8 décembre 1975 concernant la qualité des eaux de baignade. *Journal officiel des Communautés européennes*, **L31**: 1-7 (5 février 1976).
- COWAN, J. P. & JOHNSON, P. R. Reuse of sewage for agriculture in the Middle East. In: *Reuse of sewage effluent*. Londres, Thomas Telford, 1985, pp. 107-127.
- DONEEN, L. D. & WESTCOT, D. W. *Irrigation practice and management*, Rome, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1984 (Irrigation and Drainage Paper N° 1, Rev. 1).
- DURON, N. S. Mexican experience in using sewage effluent for large-scale irrigation. In: Pescod, M. B. & Arar, A., ed. *Proceedings of the FAO Regional Seminar on the Treatment and Use of Sewage Effluent for Irrigation, Nicosia, 7-9 October 1985*. Londres, Butterworths, 1985.
- EDWARDS, P. *Aquaculture: a component of low-cost sanitation technology*. Washington, DC, Banque mondiale, 1985 (Technical Paper N° 26).
- EDWARDS, P. & KAEWPAITON, K. *Fish culture for small-scale farmers*. Bangkok, Centre d'information sur l'assainissement du milieu, Institut Asien de Technologie, 1984.
- FAO. *China: recycling of organic wastes in agriculture*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1977 (Soils Bulletin N° 40).

FAROOQ, S. & ANSARI, Z. I. Water reuse in Muslim countries — an Islamic perspective. *Environmental management*, 7(2): 119-123 (1983).

FEACHEM, R. G. ET AL.. *Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management. World Bank Studies in Water Supply and Sanitation 3*. Chichester, John Wiley, 1983.

FLEISS, J. L. *Statistical methods for rates and proportions*, 2<sup>e</sup> éd. Chichester, John Wiley, 1981.

FORDHAM, J. W. Development of wastewater reuse programmes. In: *Inter-country Seminar on Wastewater Reuse, Manama, 29 September - 2 October 1984*. Document non publié WHO-EM/ES/351 du Bureau régional de l'OMS pour la Méditerranée orientale.

GAMBRILL, M. P. ET AL.. Microcomputer-aided design of waste stabilization ponds in tourist areas of Mediterranean Europe. *The public health engineer*, 14(2): 39-41 (1986).

GITTINGER, J. P. *Economic analysis of agricultural projects*. Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1982.

GOTAAS, H. P. *Compostage et assainissement*. Genève, Organisation mondiale de la Santé, 1959 (Série de monographies, N° 31).

HILLEL, D. *The efficient use of water in irrigation: principles and practices for improving irrigation in arid and semiarid regions*. Washington, DC, Banque mondiale, 1987 (Technical Paper N° 64).

HUGGINS, R. J. Constructive use of sewage with regard to fisheries. In: *Reuse of sewage effluent*. Londres, Thomas Telford, 1985, pp. 147-155.

KAYSER, R. The use of biologically treated wastewater together with excess sludge for irrigation. In: Pescod, M. B. & Arar, A., ed. *Proceedings of the FAO Regional Seminar on the Treatment and Use of Sewage Effluent for Irrigation, Nicosia, 7-9 October 1985*. Londres, Butterworths, 1985.

KING, F. H. *Farmers of forty centuries*. Londres, Jonathan Cape, 1926.

KIRBY, C. F. Irrigation with wastewater at Board of Works Farm, Werribee. In: *Water on the farm*. Report N° 25, Kingsford, NSW, Water Research Foundation of Australia, 1967, pp. 37-41.

KRISHNAMOORTHY, K. P. ET AL. Intestinal parasitic infections associated with sewage farm workers with special reference to helminths and protozoa. In: Saraf, R. K., ed. *Proceedings of the Symposium on Environmental Pollution, Nagpur, India*. Central Public Health Engineering Research Institute, 1973, pp. 347-355.

LEWIS, W. J. ET AL. *The risk of groundwater pollution by on-site sanitation in developing countries*. Dübendorf, Centre International de référence pour l'évacuation des déchets, 1982 (Report N° 01/82).

LWANGA, S. K. & LEMESHOW, S., *Détermination de la taille d'un échantillon dans les enquêtes sanométriques* Genève, Organisation mondiale de la Santé.

MARA, D. D. *Sewage treatment in hot climates*. Chichester, John Wiley, 1976.

MARA, D.D. ET AL. Brazilian stabilization pond research suggests low-cost urban applications. *World water*, 6(7): 20-24 (1983).

MARA, D. D. & SILVA, S. A. Removal of intestinal nematode eggs in tropical waste stabilization ponds. *Journal of tropical medicine and hygiene*, 89(2): 71-74 (1986).

MARA, D. D. ET AL.. The performance of a series of five deep ponds in northeast Brazil. *Water science and technology*, 19(12): 61-64 (1987).

MEADOWS, B. S. Fish production in waste stabilization ponds. In: cotton, A. & Pickford, J., ed. *Sanitation and water for development in Africa*. Loughborough, WEDC Group, University of Technology, 1983, pp. 39-42.

ORAGUI, J. I. ET AL.. The removal of excreted bacteria and viruses in deep waste stabilization ponds in northeast Brazil. *Water science and technology*, 19(12): 569-573 (1987).

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. *La réutilisation des effluents: méthodes de traitement des eaux usées et mesures de protection sanitaire; rapport d'une réunion d'experts de l'OMS*, 1973 (Série de Rapports techniques, N° 517).

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. *The risk to health of microbes in sewage sludge applied to land*. Copenhague, Bureau régional de l'OMS pour l'Europe, 1981a (Rapports et études EURO, N° 54).

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. *Manual for the planning and evaluation of national diarrhoeal diseases control programmes*. Genève, OMS, 1981b (WHO/CDD/SER/81.5).

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. *Directives de qualité pour l'eau de boisson. Volume 1. Recommandations.* Genève, OMS, 1985.

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. *Eléments d'éco-épidémiologie.* Genève, OMS, 1986 (Série des Critères d'hygiène de l'environnement, N° 27).

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. *L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture : recommandations à visée sanitaire - rapport d'un Groupe scientifique de l'OMS,* Genève, OMS, 1989 (Série de Rapports techniques, N° 778).

ORON, G. ET AL. Effluent in trickle irrigation of cotton in arid zones. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers*, **108**(IR2): 115-126 (1982).

OTIS, R. J. & MARA, D. D. *The design of small-bore sewer systems.* Washington DC, Banque mondiale, 1985 (TAG Technical Note N° 14).

PAYNE, A. J. The use of sewage waste in warm water agriculture. In: *Reuse of sewage effluent.* Londres, Thomas Telford, 1985, pp. 157-171.

PEREIRA NETO, J. T. ET AL. Pathogen survival in a refuse/sludge forced aeration compost system. In: *Effluent treatment and disposal,* Oxford, Pergamon Press, 1986, pp. 373-391.

PEREIRA NETO, J. T. ET AL. Low-cost controlled composting of refuse and sewage sludge. *Water science and technology*, **19**(12): 839-845 (1987).

PETTYGROVE, G. S. & ASANO, T. *Irrigation with reclaimed municipal wastewater — a guidance manual.* Sacramento, California State Water Resources Board, 1984 (Report N° 84-1).

POLPRASERT, C. ET AL. *Recycling rural and urban nightsoil in Thailand.* Bangkok, Institut Asien de Technologie, 1982.

ROJAS, R. ET AL. *Tratamiento y disposición final de las aguas servidas de Trujillo.* Lima, CEPIS, 1985.

ROMERO, H. *Wastewater use in agriculture in developing countries: how crop control can be used as a sanitary controlling measure.* Document non publié présenté à la Seconde réunion sur l'utilisation sans risques des déchets d'origine humaine en agriculture et aquaculture, Adelboden, Suisse, 15-19 juin 1987.

RYDZEWSKI, J. R. *Irrigation development planning: an introduction for engineers.* Chichester, John Wiley, 1987.

- SAGARDOY, J. A. *Organization, operation and maintenance of irrigation schemes*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation en Agriculture 1982 (Irrigation and Drainage Paper N° 40).
- SHENDE, G. B. Status of wastewater treatment and agricultural reuse with special reference to Indian experience and research and development needs. In: Pescod, M. B. & Arar, A., ed. *Proceedings of the FAO Regional Seminar on the Treatment and Use of Sewage Effluent for Irrigation, Nicosia, 7-9 October 1985*. Londres, Butterworths, 1985.
- SHUVAL, H. I. ET AL. *Wastewater irrigation in developing countries: health effects and technical solutions*. Washington, DC, Banque mondiale, 1986 (Technical Paper N° 51).
- SIMPSON-HEBERT, M. *Methods for gathering socio-cultural data for water supply and sanitation projects*. Washington, DC, Banque mondiale, 1983 (TAG Technical Note n° 1).
- SQUIRE, L. & VAN DER TAK, H. G. *Economic analysis of projects*. Baltimore, Johns Hopkins University press, 1975.
- STENTIFORD, E. I. & PEREIRA NETO, J. T. Simplified system for refuse/sludge composting. *Bicycle*, **26**(5): 46-49 (1985).
- STRAUSS, M. Survival of excreted pathogens in excreta and faecal sludges. *IRCWD news*, **23**: 4-9 (1985).
- STRAUSS, M. *About agricultural use of wastewater and excreta in Latin America*. Dübendorf, Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, 1986a.
- STRAUSS, M. *Wastewater use in Tunisia*. Dübendorf, Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, 1986b.
- STRAUSS, M. *Excreta disposal and fish culture in Indonesia*. Dübendorf, Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, 1986c.
- STRAUSS, M. *Wastewater and excreta use in India*. Dübendorf, Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, 1986d.
- STRAUSS, M. *Notes on the reuse practice in selected countries of the Gulf region, northern Africa and Latin America*. Document non publié présenté au Séminaire sur la réutilisation des effluents, Ministère de la Santé, Oman, avril 1987.
- TAPIADOR, D. D. ET AL. *Freshwater fisheries and aquaculture in China*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1977 (Fisheries Technical Paper N° 168).

TEICHMANN, A. Zur Methodik des quantitativen Nachweises von Helminthenstadien in kommunalen Abwässern. *Angewandte Parasitologie*, **27**: 145-150 (1986).

VENUGOPALAN, V. Foreword. In: Roy, A. K. et al., ed. *Manual on the design, construction and maintenance of low-cost waterseal latrines in India*. Washington, DC, Banque mondiale, 1984 (TAG Technical Note N° 10).

VILLALOBOS, G. G. ET AL.. Program for the reuse of wastewater in Mexico City. In: D'Itri, F.M. et al., ed. *Municipal wastewater in agriculture*. New York, Academic Press, 1981, pp. 105-144.

WATER AUTHORITIES ASSOCIATION. *Waterfacts*. Londres, Water Authorities Association, 1985.

WATER RESEARCH CENTRE. *Disinfection of sewage by chlorination*. Stevenage, Water Research Centre, 1979 (Notes on Water Research N° 23).

WATER RESEARCH CENTRE. *Application of sewage sludge to agricultural land: a directory of equipment*. Medmenham, Water Research Centre, 1984.

WOHLFARTH, G. Utilization of manure in fishfarming. In: Pastakia, C. M., ed. *Fishfarming and wastes*. London, Janssen Services, 1978, pp. 78-91.

ZANDSTRA, I. *Reclamation of nutrients, water and energy from wastes: a review of selected IDRC-supported research*. Ottawa, Centre de recherche pour le développement international, 1986 (Rapport manuscrit N° IDRC-MR124e).

ZHONGJIE, Z. Treatment and reuse of human wastes, and the present state of water resources, in China. *Water science and technology*, **18**(6/7): 9-12 (1986).

# Bibliographie

La présente bibliographie ne fournit pas la liste exhaustive des documents parus sur le problème de la réutilisation des déchets d'origine humaine, mais elle cite bon nombre des principales sources récentes concernant ce domaine et peut donc constituer une introduction utile à la littérature sur la question. On a par ailleurs tenu compte de la disponibilité de ces ouvrages et de la facilité de se les procurer dans les pays en développement. De nombreux autres documents utiles sont indiqués à la section Références.

ANON. Reuse of sewage effluent. In: *Proceedings of the International Symposium organized by the Institution of Civil Engineers, London, 30-31 October 1984*. Londres, Thomas Telford, 1985.

ARAR, A. & PESCOD, M. B. *Treatment and use of sewage effluent for irrigation*. Sevenoaks, Butterworth, 1987.

DALZELL, H. W. ET AL. *Soil management: compost production and use in tropical and subtropical environments*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1987 (Soils Bulletin, N° 56).

D'ITRI, F. M. ET AL. *Municipal wastewater in agriculture*. New York, Academic Press, 1981.

FINKEL, H. J. *Handbook of irrigation technology, Vols 1 and 2*. Boca Raton, CRC Press, 1983.

MCGARRY, M. G. & STAINFORTH J. *Compost, fertilizer and biogas production from human and farm wastes in the People's Republic of China*. Ottawa, Centre de recherche pour le développement international, 1978.

NATIONS UNIES, COMMISSION ÉCONOMIQUE ET SOCIALE POUR L'ASIE OCCIDENTALE. *Wasterwater reuse and its application in Western Asia*. Bagdad, UN-ESCWA, 1985.

OBENG, L. A. & WRIGHT, F. W. *The co-composting of domestic solid and human wastes*. Washington, DC, Banque mondiale, 1987.

SHUVAL, H. I. *Water renovation and reuse*. New York, Academic Press, 1977.

SHUVAL, H. I. *Water quality management under conditions of scarcity: Israel as a casestudy*. New York, Academic Press, 1980.

STRAUSS, M. *Health aspects of nightsoil and sludge use in agriculture and aquaculture. Part II: Pathogen survival*. Dübendorf, Centre international de référence pour l'évacuation des déchets, 1985 (Report N° 04/85).

# Glossaire

*Remarque.* Les mots soulignés font eux-mêmes l'objet d'une explication dans le glossaire.

**asperseur** Dispositif utilisé dans l'irrigation par aspersion, avec projection d'eau au-dessus du sol.

**bassin (facultatif)** Bassin dans lequel les phénomènes d'épuration sont aérobies en surface et anaérobies en profondeur.

**bassin de maturation** Dernier(s) bassin(s) d'une série de bassins de stabilisation des eaux résiduaires. Dans un bassin de maturation, les phénomènes sont strictement aérobies.

**bassin d'oxygénation** Variante du bassin de stabilisation des eaux résiduaires dans lequel on assure un apport complémentaire d'oxygène au moyen d'aérateurs mécaniques.

**bassin de stabilisation** Bassin intervenant dans le traitement des eaux résiduaires. Ces bassins sont généralement disposés en série et assurent une durée de rétention totale d'une ou plusieurs semaines.

**boues** Mélange de particules solides et d'eau déposé au fond d'une fosse septique, d'un bassin, etc.

**boues activées** Le procédé des boues activées constitue une méthode courante de traitement biologique d'une eau d'égout. Après décantation, le liquide surnageant passe dans un bassin où il est aéré par agitation mécanique ou par insufflation d'air. Les bactéries qui poussent dans le milieu sont éliminées, ainsi que d'autres matières solides, sous forme de boues dans un décanteur secondaire puis recyclées dans le bassin d'aération.

**charge (mise en charge)** La charge d'un système de traitement d'eaux résiduelles correspondant à la vitesse d'introduction dans l'installation des eaux résiduaires ou de la DBO.

**charge parasitaire** Nombre de vers parasites infestant un sujet donné. On parle aussi de degré d'infestation.

**compost** Produit analogue à l'humus résultant de la décomposition d'excreta mélangés à des matières organiques riches en carbone.

**DBO** Demande biochimique d'oxygène, grandeur mesurant la quantité de matières organiques contenues dans les eaux résiduaires.

**débouage** Elimination des boues accumulées dans une fosse septique, etc.

**décantable** Susceptible d'être éliminé par sédimentation.

**déchets** Détritus ou ordures, équivalent solide des effluents (liquides).

- degré d'infestation** Caractérise l'importance de l'infestation par un ver parasite, synonyme de charge parasitaire.
- dépuration** Pratique qui consiste à faire passer les poissons d'élevage dans un bassin ne comportant aucun apport d'engrais pendant une courte période avant la récolte.
- dose infectieuse ou infestante** Nombre moyen d'agents pathogènes qui doivent pénétrer simultanément à l'intérieur de l'organisme pour déterminer une infection ou infestation.
- durée de rétention** Durée pendant laquelle des eaux résiduares circulent dans un bassin ou toute autre installation de traitement: elle se calcule en divisant le volume de l'installation par le débit des eaux résiduares.
- eaux d'égout** Excreta humain et eaux résiduares, éliminés par chasse dans un égout.
- eaux résiduares** Dans les présentes recommandations, on entend par eaux résiduares les déchets liquides qui sont rejetés à partir des habitations, des locaux commerciaux et de sources du même ordre dans des réseaux d'évacuation individuels ou dans un réseau d'égouts municipal et qui contiennent principalement des excreta humains et des eaux usées. On peut y trouver de petites quantités de déchets industriels mais les conséquences qui en découlent ne sont pas envisagées ici.
- effluents** Liquide sortant d'une installation quelconque. Par extension, le terme désigne des effluents traités, c'est-à-dire le liquide sortant d'une installation d'épuration d'eaux résiduares.
- éjecteur** Petite ouverture par laquelle l'eau s'écoule au niveau de chaque plant ou plante dans l'irrigation localisée.
- égout** Canalisation contenant des eaux résiduares ou des eaux d'égout.
- eutrophisation ou eutrophication** Enrichissement des eaux naturelles, notamment par un apport de composés azotés et phosphorés, qui entraîne un rendement accru pour certaines espèces végétales.
- éapotranspiration** Circulation de l'eau absorbée par les plantes au niveau de l'appareil racinaire et évaporation de cette eau au niveau des feuilles et du sol.
- excreta** Excréments et urines. Dans le présent ouvrage, le terme est parfois utilisé pour désigner les boues, les boues des fosses septiques et les gadoues.
- filtration biologique (ou biofiltration)** Procédé de traitement classique des eaux résiduares, pratiqué à l'aide d'un filtre bactérien ou filtre percolateur dans lequel les eaux résiduares s'écoulent par percolation à travers un lit de matériau filtrant grossier bien aéré.

- filtre bactérien (ou filtre percolateur)** voir filtration biologique.
- fossé d'oxydation** Fossé ou chenal de Pasveer dans lequel les eaux résiduaires circulent au cours de leur traitement et sont aérées par un grand rotor.
- gadoues** Excreta humains transportés sans utilisation d'eau de chasse.
- helminthe** Ver; les helminthes dont il est question dans le texte sont des parasites, par exemple des ascaris, des schistosomes et des ténias.
- hydrogéologie** Etude des eaux souterraines et de leur circulation dans les sols.
- imprégnation saline** Accumulation excessive de sel.
- incidence** Rapport du nombre de sujets atteints d'une maladie déterminée, diagnostiquée ou signalée au cours d'une période donnée, au nombre de sujets exposés dans la population en cause.
- irrigation par calants** (à la planche) Technique d'irrigation selon laquelle on amène l'eau à l'extrémité supérieure d'une bande de terre en pente et on la laisse s'écouler de façon régulière sur toute la largeur de cette bande (ou calant).
- irrigation localisée** Irrigation au moyen d'un dispositif qui amène directement l'eau au niveau de chaque plant ou plante.
- latence** Durée nécessaire à un agent pathogène pour se développer dans le milieu ambiant avant d'être capable de déterminer une infection ou infestation.
- latrine à chasse d'eau** Latrine équipée d'un joint hydraulique, mais qui peut être nettoyée au moyen d'une petite quantité d'eau versée à la main.
- latrine à double fosse** Type de latrine à fosse comportant deux compartiments qui sont utilisés tour à tour de façon à faciliter la vidange.
- lessivage** Entraînement par l'eau des sels solubles contenus dans le sol ou un autre matériau.
- limitation de l'exposition** Mesures adoptées pour faire en sorte qu'un risque potentiel associé à certains agents pathogènes présents dans l'environnement ne se transforme pas en risque effectif de maladie.
- macrophyte** Toute plante visible à l'œil nu; les macrophytes aquatiques flottent sur l'eau.
- mésophile** Sont qualifiées de mésophiles les bactéries dont la croissance est optimale à une température comprise entre 20 °C et 40 °C.
- moyenne géométrique** Moyenne arithmétique calculée après transformation logarithmique.
- nématode** Ver rond de la classe des nématodes, par exemple les ascaris.
- organisme indicateur** Organisme dont la présence témoigne d'un risque potentiel associé à une ou plusieurs espèces d'agents pathogènes.

- parc d'engraissement** Enclos réservé à l'engraissement des animaux.
- phytotoxine** Toute substance toxique pour les végétaux.
- polyculture** Forme de pisciculture associant l'élevage de plusieurs espèces de poissons dans un même bassin.
- prévalence** Rapport du nombre de sujets atteints d'une maladie ou d'un trouble déterminé à un moment donné (indépendamment du moment où cette maladie ou ce trouble a débuté) au nombre de sujets exposés dans la population en cause.
- puits perdu** Dispositif qui facilite l'infiltration d'un effluent dans le sol.
- réseau d'égouts** Ensemble de canalisations d'égouts.
- risque effectif** Probabilité pour qu'un sujet contracte une maladie donnée au cours d'une période déterminée.
- risque potentiel** Eventualité, pour une infection ou une maladie quelconque, d'être présente, mais sans que cette présence soit effective au moment considéré.
- riveraineté** Droits conférés aux riverains d'un cours d'eau.
- sédimentation** Mécanisme par lequel s'effectue la décantation des particules solides en suspension dans l'eau ou dans les eaux d'égout, qui viennent se déposer au fond d'une citerne ou d'un bassin (décanteur).
- tas de compost** Tas allongé de matières solides en cours de compostage (compost). En général, on retourne périodiquement le tas de façon à l'aérer.
- thermophile** Sont qualifiées de thermophiles les bactéries dont la croissance est optimale à une température supérieure à 45 °C.
- traitement classique** Ces termes englobent tous les procédés de traitement des eaux résiduaires couramment utilisés en Europe, y compris la filtration biologique, le procédé des boues activées et les fossés d'oxydation. Dans ces procédés, la durée de rétention ne dépasse pas en principe quelques heures.
- trématode** Ver plat de la classe des trématodes qui comprend en particulier les vers parasites appelés douves. Les trématodes d'importance médicale doivent passer par des stades intermédiaires où ils sont hébergés par des gastéropodes; c'est le cas, par exemple, des schistosomes.