



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA PÊCHE

L'UTILISATION DES EAUX USÉES ÉPURÉES EN IRRIGATION



DOCUMENTATION TECHNIQUE
FNDAE
Hors-Série N° 11

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
ET DE LA PÊCHE
**DIRECTION DE L'ESPACE RURAL
ET DE LA FORÊT**

DOCUMENTATION TECHNIQUE
FNDAE
(Fonds National pour le Développement
des Adductions d'Eau)

Sous-Direction du Développement Rural
19, avenue du Maine - 75752 PARIS CEDEX 15

Hors-Série N° 11

L'UTILISATION DES EAUX USÉES ÉPURÉES EN IRRIGATION

Etude financée par le F.N.D.A.E. et réalisée par J.A. FABY
Office International de l'Eau
Direction de la Documentation et des Données
15, rue Edouard Chamberland - 87065 LIMOGES CEDEX
Tél. : 05 55 11 47 80 - Fax : 05 55 77 72 24
E-mail : ddd@oieau.fr

Avec l'appui technique de François BRISSAUD
Université de Montpellier

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

N° ISBN : 2-11-091-009-7

Photos de couverture :

- Rampe d'irrigation par des eaux usées épurées en Espagne (photo F. BRISSAUD - Université de Montpellier)
- Infrastructure de l'Association de Drainage et d'Irrigation de Noirmoutier (photo F. BRISSAUD - Université de Montpellier)

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
I - Eaux usées et techniques de réutilisation	7
1) Composition des eaux usées	7
1-1 Microorganismes	8
1-2 MES et matière organique	8
1-3 Substances nutritives	9
1-4 Eléments traces	10
1-5 Salinité	11
2) Traitement et stockage des eaux usées	14
2-1 Traitements conventionnels ou intensifs	14
2-2 Traitements extensifs	15
2-3 Désinfection	16
2-4 Stockage	17
3) Irrigation	18
2 - La réglementation française de la réutilisation des eaux usées épurées et de l'épandage ..	21
1) Réutilisation des eaux usées	22
1-1 Usages autorisés	22
1-2 Procédures d'autorisation et contrôle	26
2) Epandage	27
3 - Elaboration des projets de réutilisation des eaux usées	31
1) Les différentes étapes d'un projet de réutilisation des eaux usées	31
2) Evaluation des ressources et des besoins en eau	32
2-1 Ressources en eau	32
2-2 Besoins en eau	33
3) L'analyse - diagnostic de l'assainissement dans la zone concernée	33
3-1 L'état de l'assainissement	33
3-2 Les besoins en assainissement	34
4) L'étude du marché des eaux usées	34
5) Etude des scénarii	35
5-1 Consistance des scénarii	35
5-2 Etude technique	35
5-3 Etude des coûts	35
5-4 Etude d'impact	35
5-5 Analyse économique	36
5-6 Analyse financière	37
6) Cadre contractuel	37

4	- Exemples	39
1)	Exemples de réutilisation des eaux usées	39
1-1	<i>Le site de la Baie du Mont Saint Michel (Manche)</i>	39
1-2	<i>Le site de Mesnil en Vallée (Maine et Loire)</i>	40
1-3	<i>Le site de Porquerolles (Var)</i>	41
1-4	<i>Le site du Golf de Saint Palais sur Mer (Charente Maritime)</i>	42
1-5	<i>Le projet du site de Gidy (Loiret)</i>	43
1-6	<i>Le projet du site de Loudun (Vienne)</i>	44
1-7	<i>L'étude économique du Département de l'Hérault</i>	45
2)	Exemples d'épandage	46
2-1	<i>Le site de Cogolin</i>	46
2-2	<i>Le site de Oppede (Vaucluse)</i>	46
2-3	<i>Le site de Saint Mathieu de Trévières (Hérault)</i>	47
5	- Perspectives dans le cas de la France	49
1)	La réutilisation agricole des eaux usées	49
2)	L'épandage	51
6	- Annexes	53
1)	Annexe 1	53
	<i>fiche 1 Irrigation à la raie</i>	53
	<i>fiche 2 L'aspersion</i>	54
	<i>fiche 3 L'irrigation localisée</i>	55
	<i>fiche 4 L'irrigation souterraine</i>	57
2)	Annexe 2 : Désinfection des eaux usées	58
3)	Annexe 3 : Panorama général de l'utilisation agricole des eaux usées en France	60
4)	Annexe 4 : Particularisme de certains sites	66
5)	Annexe 5 : Comment distinguer réutilisation des eaux usées et épandage d'eaux usées ?	73
6)	Annexe 6 : L'épandage des effluents industriels	74
7)	Annexe 7 : Les golfs : une consommation d'eau importante	75
7	- Bibliographie	77

Introduction

L'irrigation de cultures ou d'espaces verts est, de très loin, le mode le plus répandu de réutilisation des eaux usées urbaines. C'est aussi, si on le compare aux autres modes de réutilisation, qu'il s'agisse du double réseau urbain, des usages industriels, ou des recharges d'aquifère, celui qui a le plus d'avenir à court et à moyen terme. Un guide essentiellement consacré à la réutilisation agricole des eaux usées urbaines est donc justifié.

Les eaux usées domestiques constituent l'essentiel des eaux usées urbaines. L'admission dans les réseaux d'égout d'effluents industriels dont la composition diffère notablement de celle des eaux domestiques est susceptible de compromettre les projets de réutilisation agricole.

La réutilisation des eaux usées a fait son apparition dans la réglementation française avec la Loi sur l'Eau du 3 janvier 1992. Dans son article 35, la réutilisation est mentionnée comme une alternative au rejet des effluents des stations d'épuration dans les milieux récepteurs : cours d'eau, plans d'eau, etc. Peu de temps auparavant, en juillet 1991, le Ministère chargé de la Santé avait publié des recommandations relatives à l'utilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation des cultures et l'arrosage des espaces verts élaborées par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF, 1991). La réutilisation agricole des eaux usées est donc, depuis quelques années, un mode de gestion des eaux usées reconnu par les pouvoirs publics et doté d'un cadre réglementaire.

L'utilisation agricole des eaux résiduaires est très ancienne en Europe et, en particulier, en France. Dès 1875, les effluents bruts de la ville de Paris sont répandus dans les champs d'épandage de Gennevilliers puis, ultérieurement, d'Achères, de Carrière-Triel et de Mery-Pierrelay. En 1904, 5300 hectares sont concernés par ces épandages. Les buts poursuivis étaient l'épuration des eaux d'égout et la valorisation des nutriments qu'elles contiennent. Au nombre des cultures pratiquées avec un succès qui démultipliait la valeur locative des terrains, on trouvait pommes de terres, oignons, choux, artichauts et carottes. Si la pression urbaine et l'évolution des techniques d'épuration ont progressivement fait régresser ces installations, les champs d'épandage de la Ville de Paris occupaient encore récemment quelques 2000 hectares.

On trouve aussi en France, à côté des derniers témoins des pratiques du XIXe siècle, des opérations beaucoup plus récentes de réutilisation agricole d'eaux usées urbaines qui illustrent les deux motivations de la réutilisation des eaux usées :

- réaliser des économies d'eau de première main ou accroître la ressource,
- protéger les cours d'eau, les plans d'eau, les eaux littorales, voire les eaux souterraines qui, autrement, auraient pu être pollués par les rejets des stations d'épuration.

Une seule de ces motivations peut justifier un projet de réutilisation. Sur les îles ou en bordure littorale, elles concourent toutes les deux à légitimer une gestion des eaux usées qui permet, d'une part, de maintenir une activité agricole profitable, notamment le maraîchage, et, d'autre part, de sauvegarder la conchyliculture, la pêche à pied, la baignade et, d'une manière générale, la qualité du milieu littoral.

Réutiliser les eaux usées d'une collectivité à des fins agricoles consiste à récupérer les eaux d'égout, après qu'elles aient été traitées dans une station d'épuration, à les stocker et à les utiliser pour irriguer des cultures ou arroser des espaces verts ou bien encore des terrains de sport. Les eaux usées peuvent véhiculer des nombres importants de microorganismes pathogènes. Si des précautions particulières ne sont pas prises, l'utilisation agricole des eaux résidaires peut contribuer à la transmission des maladies d'origine hydrique. L'objectif du traitement préalable à l'irrigation est précisément de réduire considérablement, sinon d'éliminer en totalité, les risques sanitaires. Le traitement des eaux d'égout, qui doit être adapté à la nature du milieu irrigué et au mode d'irrigation, est donc indispensable.

La réutilisation des eaux usées est une pratique très répandue dans les régions du monde affectées par des pénuries de ressources en eau. Elle est, par exemple, très développée aux Etats-Unis, où 34 Etats disposent de réglementations ou de recommandations - souvent très exigeantes - relatives à l'usage agricole des eaux usées (EPA & USAID, 1992). Il faut citer aussi le Mexique et plusieurs pays d'Amérique du Sud, l'Australie, l'Afrique du Sud, le Japon, la Chine et les pays du Golfe Persique, ...

Le bassin méditerranéen est l'une des régions du Monde où la réutilisation agricole des effluents urbains est la plus pratiquée. Par exemple, elle est largement systématisée en Israël, avec une réglementation très inspirée du modèle californien. La Tunisie constitue aussi un autre exemple d'une politique nationale de réutilisation. Pour sa part, l'Espagne se dote progressivement, région par région, d'une réglementation et améliore la qualité des eaux réutilisées.

En dépit des exemples cités précédemment, la réutilisation des eaux résiduaires est encore très peu développée sur le territoire français. Cela tient essentiellement à l'abondance de nos ressources en eau. Sur les parties du territoire les moins arrosées, la pluviométrie moyenne annuelle ne descend guère en dessous de 600 mm. Dans le Midi méditerranéen, les zones les moins bien pourvues sont adossées à des reliefs beaucoup plus arrosés. Par ailleurs, ces régions sont desservies par de grands équipements hydrauliques, Canal de Provence, Canal du Bas Rhône Languedoc, capables de satisfaire leurs besoins en eau. En revanche, on voit apparaître, de-ci de-là des installations qui répondent à des nécessités locales.

Les exigences croissantes de protection de l'environnement sont de nature à permettre l'émergence de projets dans lesquels la réutilisation des effluents des stations d'épuration permet, comme le suggère la Loi sur l'Eau, de protéger des milieux récepteurs sensibles - baignades, parcs conchylicoles, nappes karstiques, proximité d'un captage AEP -, ..ou de valoriser les traitements complémentaires nécessaires au maintien des usages de ces milieux.

Dans certaines opérations pilotes ou en vraie grandeur, décrites dans ce document, la valorisation des eaux usées est marginale. Elle consiste à permettre la croissance accélérée d'un boisement de peupliers ou de résineux. En vérité, ces installations relèvent plus du concept d'épuration par infiltration que de celui de réutilisation. Le boisement est alors un mode de valorisation de l'eau mais surtout une manière de paysager l'épandage. Cette démarche présente un intérêt pour les collectivités petites et moyennes et mérite qu'une partie lui soit consacrée.

Ce document est organisé de la manière suivante :

Dans la première partie sont recensées les principales données relatives aux caractéristiques des eaux usées et aux techniques mises en oeuvre dans une opération de réutilisation, depuis le traitement jusqu'à l'irrigation, en passant par le stockage.

La réglementation qui s'applique aussi bien à la réutilisation qu'à l'épandage fait l'objet de la deuxième partie. Nous avons décidé de lui accorder une place importante car elle est une clé essentielle de la faisabilité des projets et, donc, de l'avenir de la réutilisation des eaux usées épurées en France.

La troisième partie traite de l'élaboration des projets de réutilisation agricole des eaux usées épurées et des projets d'épandage.

Quelques études de cas, exposées dans la quatrième partie, illustrent les objectifs et les possibilités offertes par la réutilisation et l'épandage.

L'avenir en France de ces deux modes de gestion des eaux usées vient en conclusion.

Remarque :

Les études de cas présentées en quatrième partie ainsi que le bilan général des sites français de REU et d'épandage ont pu être réalisés avec la contribution du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité - Direction Générale de la Santé - Bureau de l'Eau, et de la DRASS de l'Hérault qui nous a transmis un premier état de l'inventaire en cours de réalisation (2^{ème} semestre 1996).

Cet inventaire qui sera publié prochainement vise à préparer l'arrêté sur les recommandations relatives à la REU en France, qui devrait paraître début 1998. Dans un souci de cohérence, nous avons pris soin de transmettre cette étude aux rapporteurs de l'arrêté pour validation.

Une irrigation de cultures ou d'espaces verts qui met en oeuvre des eaux usées n'est pas une irrigation banale. En effet, ces eaux véhiculent des pollutions qui posent des problèmes de santé publique, de conservation des sols et de protection de l'environnement, qui ne doivent être ni exagérés ni sous-estimés. Les exemples, dans de nombreux pays du pourtour méditerranéen, de périmètres arrosés depuis des décades avec des eaux usées brutes montrent que, sauf concentration importante en effluents industriels et sauf forte salinité des eaux naturelles, les rendements agricoles sont très satisfaisants. En revanche, on y observe des problèmes sanitaires et des pollutions de nappes phréatiques. Si beaucoup de composants des eaux usées (microorganismes pathogènes, métaux lourds, micropolluants organiques, ...) sont sources d'inconvénients, d'autres constituants (matière organique, azote, phosphore, potassium) contribuent à la fertilisation des sols. Certains éléments peuvent jouer des rôles différents selon leur concentration. L'azote, par exemple, est un fertilisant indispensable mais, trop concentré, il contribue à la pollution des nappes phréatiques. Aussi, chaque projet de réutilisation mérite-t-il une étude particulière, qui tient compte aussi bien de la qualité de l'eau utilisée que du contexte de la réutilisation.

Bien que quelques rares exemples contraires existent en France (Achères), les eaux usées brutes ne doivent pas être directement réutilisées. Un traitement est toujours nécessaire, différent selon le type de culture et le mode d'irrigation choisis. Ses objectifs sont de permettre le fonctionnement de l'irrigation, en supprimant notamment les risques de colmatage, d'éviter les mauvaises odeurs et surtout, chaque fois que cela est nécessaire, d'éliminer les microorganismes pathogènes. Cependant, rares seront les ingénieurs qui, en France, auront l'occasion de concevoir un projet intégré de traitement et de réutilisation des eaux d'égout. Notre pays est, fort heureusement, largement pourvu en stations d'épuration et la plupart des projets de réutilisation à venir consisteront à utiliser les effluents délivrés par des stations déjà existantes. Le volet traitement de l'étude consistera à envisager la nécessité d'un complément de traitement, en particulier pour satisfaire aux exi-

gences de protection sanitaire. Les techniques de désinfection méritent donc une considération toute particulière.

Une installation de réutilisation des eaux usées comporte toujours un stockage. Il y a deux raisons à cela. La première est que le rythme de production des eaux usées n'est pas accordé à celui de l'irrigation. La deuxième est qu'il n'y a pas de pire catastrophe pour un périmètre irrigué que l'interruption de l'approvisionnement en eau ; une réserve de sécurité est indispensable. Une troisième raison doit être énoncée : on sait maintenant que le stockage, qu'il soit effectué sous la forme d'une recharge de nappe par bassins d'infiltration ou dans un réservoir non couvert, participe à l'amélioration de la qualité de l'eau.

La réutilisation agricole met en oeuvre des techniques d'irrigation courantes. Les agriculteurs qui épandent des lisiers ou des effluents d'industries agro-alimentaires connaissent les précautions qu'il faut prendre quand on utilise des eaux polluées. Il n'est pas inutile de les rappeler ici. Les compatibilités entre les techniques d'irrigation et les normes sanitaires seront évoquées dans la deuxième partie de ce document.

1) Composition des eaux usées

On s'intéressera plus particulièrement aux substances entraînées ou dissoutes dans l'eau du fait de ses usages. On évoquera plus brièvement les problèmes - qui se posent très peu en France - relatifs à la salinité des eaux. Celle-ci, en effet, est généralement beaucoup plus la conséquence de la composition des eaux naturelles que le résultat des usages domestiques des eaux. L'irrigation avec des eaux très minéralisées est un sujet traité dans les bons manuels d'irrigation. On fera cependant une exception pour le chlorure de sodium introduit avec les infiltrations d'eaux d'origine marine dans les réseaux d'égout en bordure de mer.

La composition des eaux résiduaires urbaines brutes dépend :

- essentiellement de l'activité humaine (eaux ménagères et eaux vannes),

- de la composition des eaux d'alimentation en eau potable et, accessoirement, de la nature des matériaux entrant dans la constitution des canalisations d'eau, pour les composés chimiques,
- de la nature et de la quantité des effluents industriels éventuellement rejetés dans le réseau urbain.

Les eaux usées urbaines contiennent des matières solides, des substances dissoutes et des microorganismes. Ces derniers sont la cause des principales restrictions imposées à la réutilisation des eaux usées. La réglementation distingue des niveaux de qualité pour les eaux usées épurées, déterminés par les taux de concentration de ces microorganismes. Il est donc nécessaire de rappeler des notions élémentaires à leur sujet.

1-1 Microorganismes

Les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes. L'ensemble de ces organismes peut être classé en quatre grands groupes : les bactéries, les virus, les protozoaires et les helminthes (Tableau 1).

Les bactéries

Les eaux usées urbaines contiennent environ 10^6 à 10^7 bactéries/100 ml dont 10^5 proteus et entérobactéries, 10^3 à 10^4 streptocoques et 10^2 à 10^3 clostridiiums. La concentration en bactéries pathogènes est de l'ordre de 10^4 /l. Parmi les plus communément rencontrées, on trouve les salmonellas dont on connaît plusieurs centaines de sérotypes différents, dont ceux responsables de la typhoïde, des paratyphoïdes et des troubles intestinaux. Des germes témoins de contamination fécale sont communément utilisés pour contrôler la qualité relative d'une eau, ce sont les coliformes thermotolérants.

Les virus

Les virus sont des parasites intracellulaires obligés qui ne peuvent se multiplier que dans une cellule hôte. On estime leur concentration dans les eaux usées urbaines comprise entre 10^3 et 10^4 particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées sont difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous estimation de leur nombre réel. Les virus entériques sont ceux qui se multiplient dans le trajet intestinal ; parmi les virus entériques humains les plus importants, il faut citer les entérovirus (exemple : polio), les rotavirus, les retrovirus, les adénovirus et le virus de l'Hépatite A. Il semble que les virus soient plus résistants dans l'environnement que les bactéries et que leurs faibles dimensions soient à l'origine de leurs possibilités de dissémination.

Les protozoaires

Parmi les protozoaires les plus importants du point de vue sanitaire, il faut citer *Entamoeba histolytica*, responsable de la dysenterie amibienne et *Giardia lamblia*. Au cours de leur cycle vital, les protozoaires passent par une forme de résistance, les kystes, qui peuvent être véhiculés par les eaux résiduaires.

Les helminthes

Les helminthes sont fréquemment rencontrés dans les eaux résiduaires. Dans les eaux usées urbaines, le nombre d'oeufs d'helminthes peut être évalué entre 10 et 10^3 /l. Il faut citer, notamment, *Ascaris lumbricades*, *Oxyuris vermicularis*, *Trichuris trichuria*, *Taenia saginata*. Beaucoup de ces helminthes ont des cycles de vie complexes comprenant un passage obligé par un hôte intermédiaire. Le stade infectieux de certains helminthes est l'organisme adulte ou larve, alors que pour d'autres, ce sont les oeufs. Les oeufs et les larves sont résistants dans l'environnement et le risque lié à leur présence est à considérer pour le traitement et la réutilisation des eaux résiduaires.

L'analyse des risques sanitaires liés aux agents pathogènes susceptibles d'être transportés par les eaux usées fonde les recommandations proposées par l'Organisation Mondiale de la Santé en 1989 (OMS, 1989). Cette analyse, reprise dans le contexte national, a conduit le CSHPF à adopter les recommandations qui sont présentées dans la deuxième partie de ce rapport.

1-2 Matières en suspension et matière organique

Les matières en suspension sont en majeure partie de nature biodégradable. La plus grande part des microorganismes pathogènes contenus dans les eaux usées est transportée par les MES. Les particules en suspension, plus lourdes que l'eau, sont éliminées par décantation. C'est une étape simple dans la réduction de la charge organique des eaux usées et de la teneur en germes pathogènes. Toutefois, un traitement beaucoup plus poussé est généralement requis pour faire face aux risques sanitaires.

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

La présence de matière organique dans les eaux usées ne constitue pas, sauf cas très particulier, un obstacle à la réutilisation de ces eaux. Bien au contraire, elle contribue à la fertilité des sols. Cependant, l'expérience montre que le maintien d'une concentration importante en matière organique dans les eaux usées gêne considérablement l'efficacité des traitements

destinés à éliminer les germes pathogènes. Enfin, les concentrations significatives en matière organique peuvent aussi entraîner des odeurs désagréables, notamment s'il arrive que les eaux stagnent à la surface du sol.

1-3 Substances nutritives

L'azote, le phosphore, le potassium, et les oligo-éléments, le zinc, le bore et le soufre, indispensables à la vie des végétaux, se trouvent en quantités appréciables, mais en proportions très variables par rapport aux besoins de la végétation, dans les eaux usées épurées ou non. D'une façon générale, une lame d'eau résiduaire de 100 mm peut apporter à l'hectare :

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

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

L'azote

L'usage d'eaux usées en irrigation peut faire craindre un excès d'apports azotés. Cet excès se réfère d'une part aux tolérances de la végétation cultivée et, d'autre part, aux risques de pollution des nappes phréatiques sous-jacentes.

En effet, dans certains cas défavorables, un apport d'azote excédentaire par rapport aux besoins des cultures, peut provoquer dans un sol très perméable la contamination des eaux souterraines. Il est donc souhaitable que les apports d'azote ne soient pas disproportionnés à l'assimilation par la culture. Il est clair que la présence d'une nappe phréatique utilisée pour l'alimentation en eau des populations ou des animaux impose des contraintes qu'un projet de réutilisation d'effluents urbains doit prendre en compte.

L'azote en quantité excessive peut, dans des mesures qu'il ne faut pas exagérer, perturber certaines productions, retarder la maturation de certaines cultures, abricots, agrumes, avocats, vigne par exemple, altérer leur qualité, comme par exemple réduire la teneur en sucre des fruits ou des betteraves, accentuer la sensibilité des cultures aux maladies, la tendance à la verse pour les céréales, limiter le développement des jeunes racines....

Agents	Quantité excrétée par g/fèces	Latence	Survie	Multiplication dans l'environnement	Dose infectante DI 50 ^(a)
VIRUS					
Enterovirus	10 ⁷	0	3 mois	non	< 100
Hépatite A	10 ⁶ ?	0	?	non	?
Rotavirus	10 ⁶ ?	0	?	non	?
BACTÉRIES					
Colibacilles	10 ⁸	0	3 mois	oui	± 10 ⁹
Salmonella typhi.	10 ⁸	0	2 mois	oui	10 ⁷
Autres Salmonelles	10 ⁸	0	2-3 mois	oui	10 ⁶
Shigella	10 ⁷	0	1 mois	oui	10 ⁴
PARASITES					
Amibe dysent.	10 ⁷	0	25 jours	non	10 ± 100
Giardia lamblia	10 ⁵	0	25 jours	non	10 ± 100
Ascaris	10 ⁴	10 jours	> 1 an	non	quelques unités
Taenia	10 ⁴	2 mois	9 mois	non	1

Tableau 1 : Caractéristiques épidémiologiques de quelques agents pathogènes des eaux usées (valeurs moyennes tirées de la bibliographie)

(a) DI 50 : dose suffisante pour provoquer l'apparition de symptômes cliniques chez 50 % des individus soumis au test (source : adapté de Feachem et al, 1983)

Le phosphore

La concentration en phosphore dans les effluents secondaires varie de 6 à 15 mg/l (soit 15 à 35 mg/l en P_2O_5), à moins que l'élimination du phosphore ne soit assurée durant le traitement. La teneur en phosphore dans les eaux usées est habituellement trop faible pour modifier le rendement. Mais s'il y a excès, il est pour l'essentiel retenu dans le sol par des réactions d'adsorption et de précipitation; cette rétention est d'autant plus effective que le sol contient des oxydes de fer, d'aluminium ou du calcium en quantités importantes. On ne rencontre pas en général de problèmes liés à un excès de phosphore.

Le potassium

La concentration en potassium dans les effluents secondaires varie de 10 à 30 mg/l (12 à 36 mg/l de K_2O) et permet donc de répondre partiellement aux besoins. Il faut noter cependant que, s'il existe, un excès de fertilisation potassique conduit à une fixation éventuelle du potassium à un état très difficilement échangeable, à une augmentation des pertes par drai-

nage en sols légers, à une consommation de luxe pour les récoltes.

1-4 Eléments traces

Certains éléments traces, peu nombreux, sont reconnus nécessaires, en très faibles quantités, au développement des végétaux : le bore, le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le molybdène. L'irrigation, à partir d'eaux usées, va apporter ces éléments, mais aussi d'autres oligo-éléments, non indispensables à la plante tels que le plomb, le mercure, le cadmium, le brome, le fluor, l'aluminium, le nickel, le chrome, le sélénium et l'étain.

Les éléments traces sont, en général, immobilisés dans les couches supérieures du sol, par adsorption et échanges d'ions. Cette accumulation peut avoir pour conséquence, à terme, des risques pour le développement des plantes, la santé des hommes et des animaux. Les métaux lourds qui présentent les risques les plus notables sont le cadmium, le cuivre, le molybdène, le nickel, et le zinc. Le nickel, le cuivre et le zinc sont d'abord phytotoxiques. Au

Élément (symbole)	Eaux utilisées en permanence	Utilisation allant jusqu'à 20 ans sur des sols à texture fine ayant un pH de 6 à 8,5
	Tous types de sols mg/l	
Aluminium (Al)	5,0	20,0
Arsenic (As)	0,1	2,0
Béryllium (Be)	0,1	0,5
Bore (B)	1	2,0
Cadmium (Cd)	0,01	0,05
Chrome (Cr)	0,1	1,0
Cobalt (Co)	0,05	5,0
Cuivre (Cu)	0,2	5,0
Fluorure (F)	1,0	15,0
Fer (Fe)	5,0	20,0
Plomb (Pb)	5,0	10,0
Lithium (Li) ⁽¹⁾	2,5	2,5
manganèse (Mn)	0,2	10,0
Molybdène (Mo)	0,01	0,05 ⁽²⁾
Nickel (Ni)	0,2	2,0
Sélénium (Se)	0,02	0,02
Vanadium (V)	0,2	1,0
Zinc (Zn)	2,0	10,0

Tableau 2 : Concentrations maximales en éléments traces recommandées pour les eaux d'irrigation (Ayers et Westcot, 1985)

Ces niveaux ne doivent normalement endommager ni les plantes, ni les sols. On ne dispose d'aucune donnée concernant le mercure (Hg), l'argent (Ag), l'étain (Sn), le titane (Ti), le tungstène (W).

(1) La concentration maximale recommandée pour l'irrigation des agrumes est de 0,075 mg/l.

(2) Uniquement pour des sols acides à texture fine ou des sols acides à teneur relativement élevée en oxyde de fer.

contraire, le molybdène et, surtout, le cadmium peuvent être toxiques pour les animaux et l'homme, à des concentrations bien inférieures aux seuils de phytotoxicité.

Les concentrations maximales en éléments traces recommandées dans les eaux d'irrigation sont reportées dans le Tableau 2. Il faut toutefois garder en mémoire que, sauf exception (établissements industriels très polluants raccordés directement au réseau d'assainissement), les concentrations en métaux lourds dans les eaux résiduaires sont faibles et ne constituent pas un facteur limitant la réutilisation des eaux usées en irrigation. L'essentiel de ces métaux est retenu dans les boues des stations d'épuration. Il reste cependant prudent, afin d'éviter tout risque, de suivre la qualité des eaux recyclées et de tenir compte de leur composition dans le choix des cultures arrosées.

Eléments toxiques organiques

Une grande variété de composés organiques de synthèse peut se retrouver dans les effluents en provenance d'eaux de lessivage ou de rejets industriels. Certains se forment aussi lors des traitements de désinfection des effluents par le chlore (haloformes). Les principales familles de la chimie organique de synthèse sont représentées : hydrocarbures polycycliques aromatiques, chlorophénols, phtalates... avec une concentration de l'ordre de 1 à 10µg/l dans les effluents. Dans le sol, ces micropolluants restent liés à la matière organique ou adsorbés sur les particules du sol. Cependant, quelques composés ioniques (pesticides organochlorés, solvants chlorés) peuvent être entraînés en profondeur. Il semble que les plantes soient susceptibles d'absorber certains composés organiques, mais il existe peu de données disponibles à ce sujet. Les PCB, quant à eux, restent fixés à 97 % dans les racines. En raison de la faible solubilité de ces éléments organiques, on les retrouvera concentrés dans les boues et c'est surtout lors de l'épandage de ces dernières que leurs teneurs devront être contrôlées.

1-5 Salinité

Le principal critère d'évaluation de la qualité d'une eau naturelle dans la perspective d'un projet d'irrigation est sa concentration totale en sels solubles. On estime que la concentration en sels de l'eau usée excède celle de l'eau du réseau d'alimentation en eau potable de quelques 200 mg/l, sauf dans le cas de pénétration d'eaux saumâtres dans les réseaux d'assainissement ou lors de collecte d'eaux industrielles. Cette augmentation n'est pas susceptible, à elle seule, de compromettre une irrigation.

Bien que, sauf les cas particuliers précédents, la salinité des eaux usées ne soit pas, en France, une source de difficultés, il est bon de rappeler quelques données de base. On considère deux catégories de conséquences d'une salinité excessive de l'eau d'irrigation :

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

Salinisation

Les plantes et l'évaporation prélèvent l'eau du sol en y abandonnant une large part des sels apportés par l'eau d'arrosage, ce qui conduit à augmenter la salinité de l'eau du sol. La pression osmotique de l'eau du sol augmentant avec sa concentration en sels dissous, la plante consacre alors l'essentiel de son énergie non pas à se développer, mais à ajuster la concentration en sel de son tissu végétal de manière à pouvoir extraire du sol l'eau qui lui est nécessaire. RICHARDS, en 1969, a établi une échelle de qualité des eaux d'irrigation en fonction de leur salinité évaluée par leur conductivité électrique (Tableau 3). La tolérance de quelques plantes vis-à-vis de la salinité de l'eau d'irrigation est reportée au Tableau 4.

Qualité de l'eau	Conductivité de l'eau (mmhos/cm)	Sels solubles correspondants estimés en Na Cl (mg/l)
I. Excellente	< 0,25	< 160
II. Faibles salinité	0,25 - 0,75	160 - 500
III. Forte salinité	0,75 - 2,25	500 - 1 500
IV. Très forte salinité	2,25 - 5	1 500 - 3 600

Tableau 3 : Classes de qualité de salure de l'eau d'irrigation (Richards, 1969 in PERIGAUD J., 1977)

Culture	Rendement				
	100 %	90 %	75 %	50 %	0 %
Orge	5.3	6.7	8.7	12	19
Blé	4.0	4.9	6.3	8.7	13
Maïs	1.1	1.7	2.5	3.9	6.7
Sorgho	4.5	5.0	5.6	6.7	8.7
Betterave sucrière	4.7	5.8	7.5	10	16
Tomate	1.7	2.3	3.4	5.0	8.4
Concombre	1.7	2.2	2.9	4.2	6.8
Choux	1.2	1.9	2.9	4.6	8.1
Pomme de terre	1.1	1.7	2.5	3.9	6.7
Oignon	0.8	1.2	1.8	2.9	5.0
Luzerne	1.3	2.2	3.6	5.9	10
Féтуque	2.6	3.6	5.2	7.8	13

Tableau 4 : Rendement de quelques cultures en fonction de la salinité de l'eau d'arrosage (exprimée en dS/m) adapté de Mass et Hoffman (1977) et Mass (1984).

Ces données sont uniquement indicatives. Les tolérances absolues varient en fonction du climat, des conditions de sol et des pratiques culturales.

En dessous de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, il n'y a pratiquement pas de culture dont le rendement soit affecté par la salinité ; entre 700 et 3 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, le maintien des rendements est encore possible avec des façons culturales adéquates. En France, la salinité des eaux usées n'excède qu'exceptionnellement 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; elle ne constitue pas un obstacle à l'exploitation agricole.

Quand une tendance à l'enrichissement en sels de la solution du sol menace les rendements culturaux, elle doit être compensée par des irrigations supérieures aux besoins en eau de la culture pour entraîner la solution du sol excessivement enrichie en ions en dessous de la zone racinaire. Des abaques permettent de déterminer le taux de lessivage en fonction de la tolérance au sel de la culture et de la salinité de l'eau appliquée. Bien entendu, le projet de réutilisation doit se soucier de l'évacuation de l'eau

de lessivage. Si la perméabilité du sol n'est pas suffisante, un drainage doit être prévu.

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

Chlore et sodium

Les chlorures et le sodium peuvent également poser problème, notamment en bord de mer, quand les réseaux d'égout drainent des eaux phréatiques saumâtres (Tableau 5).

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

Concentration en Na et Cl (meq/l ^(c)) à partir desquelles on observe des brûlures des feuilles ^(d)			
moins de 5	5 - 10	10 - 20	plus de 20
Amandier	Raisin	Orge	Choux fleur
Abricotier	Pomme de terre	Blé	Betterave sucrière
Agrumes	Tomates	Concombre	Tournesol
Prunier	Gazons de golf	Sorgho	

Tableau 5 : Concentrations en Na et Cl de l'eau d'aspersion provoquant des brûlures des feuilles ^(a,b)

(a) Données de Maas (1984)

(b) Susceptibilité basée sur l'absorption directe des sels par les feuilles

(c) la concentration de Na ou Cl en meq/l peut être calculée en multipliant les mg/l par le poids moléculaire de Na (23) ou Cl (35,5). (meq/l = mg/l x poids moléculaire)

(d) Le dommage causé aux feuilles est influencé par les conditions environnementales et de culture. Ces données sont présentées uniquement en tant que guide pour l'irrigation par aspersion.

La plupart des arbres et autres plantes ligneuses pérennes sont sensibles au chlore à faible dose, alors que la plupart des cultures annuelles le sont moins. Les cultures très sensibles peuvent être affectées par des teneurs en chlore de la solution du sol à partir de 1 meq/l.

Les effets toxiques apparaissent beaucoup plus facilement quand les sels sont apportés directement sur les feuilles lors des irrigations par aspersion. C'est particulièrement vrai pour le Cl et le Na. Quelques valeurs de tolérances au chlore et au sodium sont données au Tableau 5. Les risques sont moindres avec des irrigations nocturnes.

Quand les eaux réutilisées ont été chlorées et que le résiduel en chlore est trop élevé au moment de l'irrigation, les cultures peuvent souffrir si elles sont arrosées par aspersion. Mais le chlore résiduel libre (HOCl, OCl⁻, Cl₂) est très réactif et instable dans l'eau ; il suffit alors de stocker l'eau quelques heures dans un réservoir ouvert pour l'éliminer. Une teneur en chlore résiduel inférieure à 1 mg/l est sans danger pour le feuillage, mais une concentration supérieure à 5 mg/l serait hautement dommageable. La plupart des projets d'irrigation ne devraient pas rencontrer ce problème s'ils utilisent un réservoir de stockage intermédiaire ; mais il est important de redoubler de précautions si ce réservoir est court-circuité et que l'effluent est directement utilisé.

Le bore

Dans les eaux usées, le bore provient des lessives et des rejets industriels. A des concentrations très faibles, le bore est indispensable à la croissance des végétaux, ces besoins sont toujours largement couverts par les eaux usées ; mais lorsque sa concentration excède 1 mg/l, il peut être toxique pour les plantes les plus sensibles (Tableau 6).

Sodisation

L'accumulation de sodium (sodisation) sur le complexe adsorbant des sols peut dégrader les propriétés physiques des sols.

Leur capacité de drainage, donc leur perméabilité, conditionne la productivité des terres irriguées. Un excès de sodium par rapport aux alcalino-terreux (calcium, magnésium, ...) dans le complexe adsorbant provoque une défloculation des argiles, une destruction du sol qui se traduit par une réduction de la perméabilité et de la porosité des couches superficielles du sol. L'eau d'irrigation stagne alors à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines. D'autre part, à proportions égales de sodium et d'alcalino-terreux dans la solution, la tendance à la sodisation du sol est d'autant plus forte que la concentration en cations totaux dans la solution est plus élevée. Ainsi, les risques de sodisation relatifs à une eau d'irrigation sont caractérisés par deux paramètres : le SAR (Sodium Adsorption Ratio), qui rend compte du rapport entre les concentrations en sodium et en alcalino-terreux, et la conductivité de l'eau appliquée.

Le SAR défini comme égal à :

$$Na^+ / \sqrt{(Ca^{++} + Mg^{++})/2}$$

(Na⁺, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ étant exprimés en meq/l) peut être ajusté pour mieux tenir compte du calcium susceptible de demeurer sur le sol après une irrigation. L'U.S. Salinity Laboratory a proposé un diagramme qui, à partir des valeurs du SAR et de la conductivité, classe les eaux d'irrigation en fonction des risques de sodisation et de salinité.

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

Tableau 6 : Concentrations maximales en Bore dans l'eau d'arrosage basées sur l'apparition de symptômes de toxicité lors de cultures sur sable (source : Shainberg et Oster, 1978)

2) Traitement et stockage des eaux usées

Bien que quelques rares exemples contraires existent en France, les eaux usées ne doivent pas être réutilisées brutes. Un traitement est toujours nécessaire, différent selon le type de culture et le mode d'irrigation choisis. Les objectifs principaux sont :

- permettre le fonctionnement de l'irrigation, en réduisant les risques de colmatage,
- éviter les mauvaises odeurs,
- éliminer les micro-organismes pathogènes, chaque fois que la réglementation l'exige,
- réduire la teneur en azote, quand la protection d'une nappe souterraine l'impose.

D'autre part, les projets de réutilisation concernent souvent les effluents de stations d'épuration existantes. Il est donc nécessaire de rappeler rapidement les performances des principaux procédés d'épuration par rapport aux objectifs précédents (Voir synthèse en Figure 1 page 19).

2-1 Traitements conventionnels ou intensifs

Décantation primaire

Elle est chargée d'éliminer la fraction la plus grossière des matières décantables des eaux usées. 40 à 60 % des matières en suspension sont ainsi éliminées et, avec elles, de 25 à 40% des matières organiques. La décantation primaire a peu ou pas d'effets sur l'élimination des virus et des bactéries ; les abattements cités sont de l'ordre de 10 à 30%. Dans un bassin de décantation classique, ayant un temps de séjour de 2 à 3 heures, et une vitesse ascensionnelle de 1,2 m/h, le rendement d'élimination global des oeufs d'helminthes est de 50 à 90% (plus important pour les schistosomes et les trichures que pour les taenias et les ascaris). Les kystes de protozoaires, plus petits, ont une vitesse de sédimentation trop faible et sont mal éliminés (moins de 50%).

Traitements physico-chimiques

Des traitements de coagulation et de floculation permettent, grâce à l'addition de réactifs chimiques, de séparer les fines particules en suspension et une partie de la fraction colloïdale. Après la coagulation et la floculation, la séparation de la phase aqueuse de la phase solide est réalisée par un traitement physique, décantation ou flottation.

Ces procédés permettent d'obtenir des abattements de 50 à plus de 90 % des matières en suspension. La charge polluante organique est réduite dans des proportions bien supérieures à ce que procure une simple décantation pri-

maire. L'élimination des coliformes fécaux et des virus est fonction de la valeur du pH qui résulte de l'ajout de floculant.

Traitements biologiques secondaires

Lits bactériens

L'effluent prétraité est uniformément réparti par un dispositif d'arrosage sur un bassin circulaire rempli de pierres concassées, pouzzolane, mâchefers ou de garnitures plastiques. Pendant son ruissellement, il est oxydé par les bactéries hétérotrophes du biofilm qui se développe à la surface des matériaux. Un tel procédé permet, après décantation secondaire, d'obtenir des eaux épurées contenant 30 mg/l de MES, 90 mg/l de DCO, 30-40 mg/l de DBO₅.

Les lits bactériens arrêtent difficilement les virus et les bactéries. La littérature rapporte des abattements de l'ordre de 30 à 40 % pour les virus et de l'ordre de 50 à 95 % pour les bactéries. Ces valeurs peuvent être améliorées par la décantation secondaire.

L'élimination des kystes de protozoaires et des oeufs d'helminthes n'est pas plus efficace. Des valeurs de 83 à 99 % et de 20 à 90 % sont citées pour l'élimination, respectivement, d'*Entamoeba histolytica* et pour les oeufs d'helminthes.

Boues activées

L'oxygène nécessaire à l'oxydation des eaux usées est apporté au moyen d'aérateurs de surface ou de diffuseurs immergés, répartis le long du bassin. Les boues formées sont séparées du liquide dans un décanteur secondaire et une partie d'entre elles est recyclée vers le bassin d'aération. Les installations de boues activées sont conçues pour fournir des effluents contenant moins de 30 mg/l de matières en suspension, moins de 25 mg/l de DBO et moins de 100 mg/l de DCO.

Ce procédé a peu d'effet sur l'élimination des kystes de protozoaires et sur les oeufs d'helminthes, même si une partie des oeufs est éliminée dans le décanteur secondaire. Ainsi, de 80 à 100 % des oeufs d'helminthes peuvent être éliminés par une station à boues activées.

Il a plus d'effet sur l'élimination des virus que les lits bactériens, puisque leurs taux d'élimination est de l'ordre de 90 %. La réduction des concentrations bactériennes est du même ordre de grandeur : 60 à 90 % et jusqu'à 99 % des bactéries peuvent disparaître.

Biofiltration

Les procédés biologiques modernes à biomasse fixée conduisent à une excellente élimination des MES et des matières organiques. On ne dispose pas de données relatives à leurs performances vis-à-vis de l'élimination des microor-

ganismes pathogènes. On peut, en première approximation, estimer qu'elles ne diffèrent pas sensiblement de celles des stations à boues actives.

Nitrification - Dénitrification

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

2-2 Traitements extensifs

Les traitements extensifs sont souvent préférés aux traitements conventionnels pour assurer l'épuration des eaux usées des collectivités petites et moyennes. La raison de cette préférence est leur fiabilité, la simplicité de leur gestion et la modestie des coûts de fonctionnement.

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

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

Lagunage naturel

L'épuration par lagunage résulte de processus aérobies et anaérobies qui se développent dans plusieurs bassins peu profonds disposés en série. On distingue trois types de bassins selon le processus dominant mis en jeu : les bassins facultatifs, les bassins aérobies et les bassins de maturation. Les principaux processus sont :

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

L'élimination de la DBO_5 est significative, mais une partie importante de la DCO incidente se retrouve dans les effluents du lagunage sous forme d'algues.

En période estivale, quand le lagunage est bien dimensionné, une large fraction de l'azote et une part importante du phosphore sont éliminées.

Les protozoaires et les helminthes sont éliminés essentiellement par décantation. Il semble que 100 % d'entre eux puissent être éliminés

par tous les lagunages bien conçus, comportant plusieurs bassins et avec un temps de rétention supérieur à 20 jours.

L'élimination des bactéries a lieu, pour l'essentiel, dans les bassins aérobies. On sait qu'elle est notamment fonction de l'ensoleillement, du temps de séjour et de la température. Pour fixer les idées, on peut dire que la teneur en coliformes fécaux de l'effluent d'un lagunage bien conçu - sans cheminement préférentiel -, comportant au moins trois bassins profonds de 1,2 à 0,7 m, ayant un temps de séjour supérieur à 60 jours - et 20 jours pour un lagunage tertiaire - sous des températures de l'ordre de $20^{\circ}C$, n'excède pas $10^3/100$ ml. Les temps de séjour prolongés, associés à une bonne exposition de l'eau à la lumière solaire confèrent aux lagunages de bonnes capacités de désinfection. L'élimination des virus est, d'après Shuval et al., 1986, un peu moins efficace que celle des bactéries.

Epuration par infiltration

Infiltration-percolation

L'infiltration-percolation consiste à infiltrer les eaux usées issues de traitements primaires ou secondaires dans des bassins de faible profondeur creusés dans le sol en place ou remplis de massifs sableux rapportés. Les matières en suspension sont arrêtées à la surface du massif filtrant, leur accumulation entraînant un colmatage qui doit être géré en alternant phases d'infiltration et phases de séchage. L'épuration nécessite une infiltration en milieu poreux non saturé et le renouvellement de la phase gazeuse par l'air atmosphérique qui apporte l'oxygène indispensable à l'oxydation des matières organiques et de l'azote. Ce renouvellement passe par une infiltration intermittente.

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

Dans des installations modernes d'infiltration-percolation destinées à traiter des effluents secondaires, les abattements des coliformes fécaux sont compris entre 2 et 4 unités logarithmiques et ceux des bactériophages entre 1,5 et 3 u. log.. Ces installations sont alimentées par des pivots ou des rampes mobiles de manière à garantir l'homogénéité de la répartition de l'influent sur les surfaces d'infiltration.

Epandage

L'épandage est un moyen à la fois d'épurer et d'évacuer les eaux usées dans le sol. Ce n'est pas un traitement qui conduit à la réutilisation, mais c'est un système, simple, robuste et peu coûteux, à la disposition des collectivités rurales pour gérer le devenir de leurs eaux d'égout.

L'épandage s'apparente à la réutilisation des eaux usées épurées quand celles-ci font l'objet d'une valorisation marginale, généralement sous la forme d'un boisement dont la croissance est considérablement accélérée par l'apport régulier d'eau et de nutriments.

L'épandage est soit superficiel, soit souterrain. Cette deuxième solution est préférable, car elle minimise les risques sanitaires, les risques d'odeurs et n'oblige pas à interdire l'accès de la parcelle concernée.

La charge hydraulique applicable est de l'ordre de quelques dizaines de litres par mètre carré et par jour. Elle est supérieure aux besoins de la végétation. Elle est fonction du sol en place. Le sol ne doit pas être saturé, de façon que la végétation se développe normalement. La charge appliquée doit être telle que le sol puisse en assurer l'épuration, avec des objectifs déterminés en fonction du contexte local. Elle peut être estimée à partir de la relation suivante :

$$H = ET - Pr + I$$

avec H, la charge hydraulique applicable, ET, l'évapotranspiration, Pr, la précipitation et I, le débit unitaire d'infiltration acceptable pris entre 4 et 10 % de la perméabilité du sol à l'eau claire (EPA, 1981). Pour les épandages souterrains, on peut aussi s'aider de l'état de l'art applicable à l'assainissement autonome semi-collectif. Les doses peuvent être un peu augmentées dans le cas d'un épandage tertiaire.

Quand un épandage assure un traitement principal, il est précédé - selon la taille de l'installation - par une ou plusieurs fosses septiques, un décanteur-digesteur ou une lagune primaire. Le but de ces systèmes est de réduire la charge organique que le sol reçoit et, surtout, de limiter les risques de colmatage des dispositifs de répartition de l'eau dans l'épandage.

Le réseau de répartition utilise les techniques agricoles : irrigation à la raie, irrigation

localisée en surface ou souterraine, réseaux de tuyaux enterrés et, sous condition qu'il n'y ait pas de risque de dissémination d'aérosols, l'aspersion. Certains de ces systèmes doivent être précédés d'un filtre.

La pollution résiduelle la plus probable, s'il y a une nappe phréatique sous l'épandage, est relative aux nitrates. On trouvera aussi dans le manuel de l'EPA (1981) une estimation des charges hydrauliques applicables pour ne pas accroître la pollution de la nappe.

2-3 Désinfection

Les techniques conventionnelles sont capables d'éliminer, dans des proportions variables, les matières en suspension et les matières organiques. Mais aucune d'entre elles n'offre une véritable protection vis-à-vis des risques sanitaires. A cet égard, la réglementation relative à la réutilisation des eaux usées distingue plusieurs niveaux de qualité d'eau, en fonction de l'élimination des oeufs de parasites et des coliformes fécaux (Tableau 7).

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

Pour obtenir une eau de type B, il faut éliminer pour une grande part les oeufs d'helminthes ; ce qui peut être fait en complétant la chaîne de traitement par un procédé extensif, une lagune de maturation ou un stockage ou encore une infiltration percolation. Une filtration rapide devrait aussi pouvoir remplir ce rôle mais les données qui pourraient confirmer son efficacité font encore défaut.

Une eau de type A exige en plus l'élimination des coliformes fécaux par une méthode de désinfection. Ce traitement complémentaire revêt une importance particulière car, en dépit des restrictions imposées par les recommandations du CSHPF, les eaux de type A ouvrent sur les réutilisations les plus attractives pour les collectivités locales.

L'élimination des coliformes fécaux exige soit un traitement extensif soit un traitement conventionnel transposé des techniques de pré-

Type d'eau	Teneur en oeufs d'helminthes intestinaux	Concentration en coliformes thermotolérants
A	≤ 1 par litre	≤ 10 ³ /100 ml
B	≤ 1 par litre	pas de contrainte
C	pas de contrainte	pas de contrainte

Tableau 7 : Niveaux de qualité d'eaux usées, en vue de leur réutilisation, en fonction de la teneur en oeufs d'helminthes et des coliformes thermotolérants

paration des eaux potables. Ces techniques sont soit chimiques - utilisation du chlore et de ses dérivés, ozonation - soit physiques - rayonnements ultra-violet, ultrafiltration. L'efficacité de ces procédés dépend, dans une large mesure, de la qualité de l'eau traitée et, en particulier, de sa teneur résiduelle en matière organique et en matières en suspension.

2-4 Stockage

Le stockage que comporte toute installation de réutilisation d'eaux usées a des dimensions très différentes selon les objectifs poursuivis.

S'il s'agit seulement d'une réserve de régulation destinée à mettre la demande d'eau d'irrigation à l'abri des variations journalières du flux de sortie de la station d'épuration, son volume sera l'équivalent de 24 à 72 heures de consommation. Le volume stocké pourra être plus important s'il doit faire face aux risques d'interruption de l'approvisionnement en eau épurée ou aux pannes des systèmes de traitement. Dans les régions véritablement déficitaires en ressources en eau, le stockage est intersaisonnier ; il emmagasine l'eau inutilisée en période hivernale, qui sera utilisée durant l'été. Le volume du stockage est alors l'équivalent de plusieurs mois de consommation.

On distingue deux types de stockage intersaisonnier : (i) la recharge de nappe, (ii) les réservoirs de stabilisation. Le choix entre ces deux procédés dépend naturellement du contexte hydrogéologique. La recharge de nappe exige une nappe phréatique suffisamment perméable, qui ne soit pas déjà exploitée pour la production d'eau potable dans la zone intéressée par la recharge, et des sites propices à l'infiltration (voir description du site du Lavadou en Annexe 4). Un contexte hydrogéologique favorable n'est pas si courant. Au contraire, l'installation d'un réservoir de stabilisation est moins contraignante ; elle exige essentiellement qu'un terrain soit disponible.

Recharge de nappe aquifère

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

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

Les techniques de surface, l'infiltration percolation et l'épandage, sont par contre beaucoup plus accessibles. Ces techniques, dont les principes ont été exposés précédemment (voir paragraphe 2-2 de ce chapitre), utilisent les capacités

épuration des sols en place. Elles combinent épuration complémentaire et recharge de nappe. Elles rendent possible l'utilisation d'eaux de qualité variée. Les épaisseurs de zone non saturée et les transits dans la nappe permettent d'obtenir, par pompage, une eau propre à des irrigations non restrictives.

Il faut souligner que le succès d'une opération de recharge de nappe dépend beaucoup de la qualité des études hydrogéologiques et pédologiques préalables.

Réservoirs de stabilisation

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

Les très nombreux réservoirs intersaisonniers réalisés en Israël, où ce procédé est le plus développé, sont profonds de 5,5 à 15 m pour limiter les pertes par évaporation et la surface occupée. Ces réservoirs, appelés réservoirs de stabilisation, dans lesquels la charge organique appliquée ne doit pas excéder 30 à 40 kg de DBO par hectare et par an, fonctionnent un peu à la manière des lagunages facultatifs. La partie supérieure de la masse d'eau est aérobie ; la partie inférieure est anaérobie. Une partie de l'azote est éliminée, soit par stripping de l'azote ammoniacal, soit par nitrification et dénitrification. Une fraction du phosphore entré dans le réservoir se trouve accumulée dans les sédiments. Les bactéries sont éliminées dans la tranche d'eau supérieure, sous l'effet de la lumière et des pH élevés.

L'efficacité de l'épuration, particulièrement l'élimination des coliformes fécaux et des bactériophages, diffère selon que le stockage est alimenté continuellement - au rythme des débits produits par une station d'épuration - ou qu'il est rempli dans un délai de quelques jours à quelques semaines puis isolé. Dans ce deuxième cas, l'efficacité est considérablement accrue (Juanico, 1996).

L'expérience française de ce type de stockage est très limitée. Mais elle pourrait être rapidement améliorée par l'étude des installations des îles du littoral atlantique (Noirmoutier et Ré) et du fait du développement du stockage comme moyen de supprimer les rejets des stations d'épuration dans les milieux vulnérables en période d'étiage.

3) Irrigation

Les besoins en eau d'irrigation, I_r , sont déduits de la relation suivante :

$$I_r = ET - P + R + I + P_e$$

avec ET , l'évapotranspiration, P , la pluie, R , les pertes par ruissellement, I , les pertes par percolation et P_e les pertes dans le système de distribution.

Les besoins dépendent de la culture pratiquée, du climat - soit de la pluviométrie et de l'évaporation -, de la nature du sol, du mode d'irrigation et des dispositifs d'alimentation du périmètre et de répartition dans la parcelle irriguée. Ces besoins sont donc très variables et leur évaluation dans le cadre d'un projet mérite une analyse particulière (on se référera utilement au site du Mont Saint Michel au chapitre 4).

Sous le climat métropolitain, les besoins journaliers les plus élevés ne dépassent pas la centaine de mètres cubes par hectare.

Les besoins annuels peuvent varier de quelques centaines à quelques milliers de mètres cubes par hectare. Parmi les besoins les plus élevés, il faut citer ceux des gazons (espaces verts et terrains de golf), des cultures maraîchères et des vergers.

En annexe 1, sont décrites un certain nombre de techniques d'irrigation susceptibles d'être mises en oeuvre.