



L'IRRIGATION AVEC DES EAUX USEES TRAITEES

MANUEL D'UTILISATION

**Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
Bureau Régional pour le Proche-orient et Bureau sous-régional pour l'Afrique du Nord**

Septembre 2003

REMERCIEMENTS

Le Bureau Régional de la FAO pour le Proche-orient voudrait remercier sincèrement les personnes et les organisations suivantes de leurs efforts appréciés dans la préparation, l'édition, la traduction et la mise à jour de ce manuel.

1. M. Ioannis Papadopoulos, Centre de Recherches Agronomiques, Chypre.
2. M. Selim Sarraf, ex-Fonctionnaire Régional, Irrigation et Ressources en Eau, Bureau Régional de la FAO pour le Proche-orient
3. M. Yusri Sultan, ex-Fonctionnaire Régional, Traduction et Publications, Bureau Régional de la FAO pour le Proche-orient
4. M. Bazza, Fonctionnaire Principal Régional, Ressources en Eau et Irrigation, Bureau Régional de la FAO pour le Proche-orient
5. M. Ghassan Hamdallah, Fonctionnaire Principal Régional, Sols, Bureau Régional de la FAO pour le Proche-orient
6. M. Kumars Khosh-Chashm, ex-Conseiller Régional, Approvisionnement en Eau, Hygiène et Logement, OMS/EMRO, Alexandrie.
7. M. Saqr Al-Salem, Conseiller Régional, Information et Transfert de Technologie, OMS/CEHA, Amman, Jordanie.
8. M. Xanthoulis Dimitri, Professeur, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique
9. Membres de l'IATF, représentants de ces organismes:
 - ACSAD (Bureau Régional du Caire)
 - AOAD (Bureau Régional du Caire)
 - CEDARE
 - ESCWA
 - ICARDA (Bureau Régional du Caire)
 - l'UNESCO (Bureau Régional du Caire, ROSTAS)
 - OMS (Bureau Régional pour l'est de la Méditerranée)

AVANT-PROPOS

La pénurie d'eau est un fait largement reconnu dans l'ensemble du Proche Orient. Quelques 16 pays de la région tombent sous le niveau de pénurie de 500 m³ d'eau renouvelable par personne et par an. Presque toutes les ressources accessibles d'eau douce dans la région sont déjà mobilisées; par conséquent, il est normal de se tourner vers des ressources d'eau non conventionnelles pour satisfaire l'accroissement de la demande. Plusieurs pays de la région (comme les Etats du Golfe) ont fait de grands efforts en matière de dessalement de l'eau de mer pour satisfaire les demandes urbaines de leurs populations. Cependant, en raison du coût élevé associé à cette technologie, son adoption est généralement limitée aux usages domestiques dans des pays à haut revenu. D'autres options, comme l'utilisation de l'eau de drainage ou son mélange avec l'eau douce pour l'irrigation, sont déjà courantes dans plusieurs pays.

L'eau usée traitée récoltée à l'aval des systèmes d'assainissement urbains représente une eau renouvelable non conventionnelle, qui pourrait être une source attrayante et bon marché à employer en agriculture, au voisinage des centres urbains. Cependant, en raison de la nature variable de la composition de cette eau (sa charge en constituants minéraux, organiques et biologiques); sa réutilisation devrait être gérée soigneusement, surveillée et contrôlée par des spécialistes, afin de vérifier les risques et menaces potentiels sur les usagers, le sol, l'eau et les cultures irriguées avec elle, ainsi que sur l'environnement dans son ensemble.

Le présent manuel est produit en anglais, en arabe et en français par le Bureau Régional de la FAO pour le Proche-orient (FAO/RNE), avec la collaboration du Bureau Régional pour le Méditerranée Orientale de l'Organisation Mondiale de la Santé. Le Bureau Sous-régional pour l'Afrique du Nord de la FAO (FAO/SNE) a collaboré étroitement pour la traduction et l'édition de la présente version française du manuel. Le manuel se veut être une étape vers la promotion de l'utilisation en agriculture (principalement en irrigation) de l'eau usée traitée, avec des informations techniques judicieuses, fournies pour une utilisation sans risque et efficace de cette eau "spéciale", dans l'optique d'un risque minimum et d'une protection de l'environnement maximum.

TABLE DES MATIERS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1 | Objectifs | 2 |
| 1.2 | La demande globale en eau au Proche Orient | 2 |
| 1.3 | Avantages et limites de la réutilisation de l'eau usée | 3 |
| 2 | EVALUATION DE LA QUALITE DE L'EAU USEE TRAITEE POUR L'IRRIGATION..... | 4 |
| 2.1 | Caractéristiques chimiques et physiques des eaux usées | 4 |
| 2.1.1 | <i>Traitement des eaux résiduaires</i> | 4 |
| 2.1.2 | <i>Traitement et considérations de la qualité des eaux usées</i> | 5 |
| 2.1.3 | <i>Critères de qualité des eaux usées pour l'irrigation</i> | 5 |
| 2.2 | Critères de qualité biologique | 15 |
| 2.3 | Code de bonnes pratiques..... | 16 |
| 2.4 | Préalables à une réutilisation efficiente et efficace | 16 |
| 2.4.1 | <i>Code de bonnes pratiques pour la fertilisation des récoltes irriguées avec l'eau usée traitée: approche étape-par-étape</i> | 16 |
| 2.5 | La surveillance et l'évaluation microbiologique..... | 23 |
| 3 | IRRIGATION AVEC L'EAU USÉE TRAITÉE..... | 25 |
| 3.1 | Méthodes d'irrigation | 25 |
| 3.1.1 | <i>Méthodes (traditionnelles) de surface</i> | 25 |
| 3.1.2 | <i>Méthodes d'irrigation sous pression</i> | 25 |
| 3.1.3 | <i>Choix du système d'irrigation</i> | 26 |
| 3.2 | Quantités d'eau et programmation des irrigations..... | 26 |
| 3.3 | Stratégie pour protéger la santé humaine et l'environnement | 29 |
| 3.3.1 | <i>Choix des cultures pour la protection sanitaire</i> | 29 |
| 3.4 | Restrictions des cultures basées sur la composition chimique des eaux usées | 31 |
| 3.5 | Contrôle de l'exposition humaine aux déchets et de l'hygiène..... | 31 |
| 4 | ASPECTS SANITAIRES DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES EN AGRICULTURE..... | 33 |
| 4.1 | Les acquis..... | 33 |
| 4.2 | Considérations sur la qualité microbiologique de l'eau usée pour la réutilisation en agriculture..... | 34 |
| 4.2.1 | <i>Contamination de l'environnement par les parasites intestinaux</i> | 34 |
| 4.2.2 | <i>Prévalence et intensité des infections helminthiques dans la région</i> | 35 |
| 4.2.3 | <i>L'intégration des diverses mesures pour la protection sanitaire (OMS 1998)</i> | 35 |
| 4.2.4 | <i>Questions spéciales relatives à la santé</i> | 38 |
| 5 | ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ASSOCIÉS À L'UTILISATION DES EAUX USÉES EN IRRIGATION..... | 40 |
| 5.1 | Effets sur le sol..... | 40 |
| 5.2 | Effets sur les eaux souterraines | 40 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.3 | Effets sur les eaux de surface | 41 |
| 5.3.1 | <i>Eutrophisation, croissance des algues</i> | 41 |
| 5.4 | Effets sur les cultures : Problème de phytotoxicité et gestion..... | 41 |
| 5.5 | Problèmes de santé animale | 41 |
| 6 | MESURES DE CONTROLE | 43 |
| 6.1 | Considérations générales..... | 43 |
| 6.2 | Directives de réutilisation des eaux usées | 43 |
| 6.3 | Contrôle de qualité de l'eau usée | 43 |
| 6.4 | Contrôle des équipements de stockage, de transport et de distribution | 43 |
| 7 | ASPECTS SOCIOCULTURELS, LÉGAUX, INSTITUTIONNELS ET ÉCONOMIQUES..... | 46 |
| 7.1 | Acceptabilité sociale et information du public..... | 46 |
| 7.2 | Formation et développement des ressources humaines..... | 46 |
| 7.3 | Aspects institutionnels, surveillance et mesures de contrôle | 47 |
| 7.4 | Considérations réglementaires et questions de droit | 47 |
| 7.5 | Aspects économiques | 48 |
| 8 | LES BOUES RESIDUAIRES | 49 |
| 8.1 | Composition des boues..... | 49 |
| 8.2 | Les boues comme engrais et conditionneur de sol..... | 50 |
| 8.3 | Contraintes à l'utilisation..... | 51 |
| 8.3.1 | <i>Microorganismes pathogènes.</i> | 51 |
| 8.3.2 | <i>Métaux lourds.</i> | 52 |
| 9 | GLOSSAIRE..... | 54 |
| 10 | REFERENCES..... | 58 |
| | ANNEXE I | 60 |
| | ANNEXE II..... | 61 |
| | ANNEXE III | 62 |
| | ANNEXE IV..... | 65 |

1 INTRODUCTION

La population du Proche Orient a augmenté considérablement et le besoin en nourriture et en eau croît continuellement. Traditionnellement, cette situation a été solutionnée en augmentant simplement l'approvisionnement en eau et/ou en développant l'agriculture. Aujourd'hui cette solution s'approche de ses limites naturelles. Dans un certain nombre de pays de cette région, la consommation réelle de l'eau s'approche rapidement des limites des ressources disponibles. Par ailleurs, les terres agricoles deviennent rares. Pour la plupart des pays de la région, l'eau est ainsi devenue le facteur principal limitant leur développement et constitue un défi économique, social et politique important. Par conséquent, l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles et la gestion globale de l'eau de façon efficace et efficiente, sont devenues des problèmes urgents dans la plupart des pays du Proche Orient. L'épuration de l'eau usée et son utilisation en irrigation est une option attrayante, en particulier dans les zones arides et semi-arides de la région, car elle représente une source d'eau et d'engrais additionnels renouvelables et fiables. Les déchets solides sont moins utilisés et plus difficiles à être appliqués. Des précautions sont donc nécessaires à cause de la charge des boues résiduelles en métaux lourds et en oeufs de parasites.

L'utilisation de l'eau usée traitée et des boues résiduelles, au-delà de leurs effets positifs, peut également avoir des impacts défavorables sur la santé publique et l'environnement, en fonction principalement des caractéristiques de l'eau épurée et des boues, du degré d'épuration, de la méthode et de l'endroit d'utilisation. La pollution du sol et des eaux souterraines et de surface est parmi les inconvénients potentiels les plus importants de l'utilisation d'eau usée traitée. Cependant, du point de vue rigoureusement scientifique, la planification rigoureuse et la gestion efficace des régimes d'irrigation ou de fertilisation peuvent réduire au minimum ces inconvénients, à un niveau dont les effets environnementaux sont insignifiants. Pour cette raison, il est important de fournir aux agriculteurs l'information requise pour les aider à améliorer la gestion de l'eau usée traitée, utilisée pour l'irrigation, et des déchets solides, servant à la fertilisation. C'est maintenant possible grâce aux informations et à l'expérience considérable acquises au niveau régional, au travers de projets de réutilisation menés avec succès. Dans ce manuel une tentative est faite pour :

- consolider la connaissance et l'expérience acquises sur la réutilisation dans les pays de la région;
- fournir des conseils de bonnes pratiques agricoles dans une approche de gestion intégrée.

En 1989, l'OMS a édité "**Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture**" (L'utilisation des eaux usées en agriculture et aquaculture: recommandations à visée sanitaire). Au cours de la même année, le PNUE et l'OMS, ont conjointement édité "**Guidelines for the Safe Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture**", (Guide pour l'utilisation sans risques des eaux résiduelles et des excréta en agriculture et aquaculture), avec un accent particulier sur la protection de la santé publique et l'environnement. En 1991, le PNUE et la FAO ont conjointement édité "**Environmental guidelines for wastewater reuse in the Mediterranean Region**" (Guide environnemental pour la réutilisation de l'eau usée en région méditerranéenne). Ce document a été suivi d'une publication de la FAO sur le traitement des eaux résiduelles et leur emploi en l'agriculture "**Wastewater Treatment and Use in Agriculture**", en 1992. Ces directives ont aidé beaucoup de pays en voie de développement dans la mise en application ou l'amélioration de systèmes de réutilisation d'eau usée sains et sûrs, adaptés à leurs propres conditions

techniques, socio-économiques et culturelles. Le bureau régional de la FAO au Caire a également produit, en 1995, une publication sur la gestion de l'eau usée et la protection de l'environnement dans la région du Proche Orient, intitulée : "**Wastewater management and environmental protection in the Near East Region**" et de 1991 à 1993 sept bulletins techniques ayant pour objet un meilleur usage de l'eau usée en agriculture, ont été publiés pour aider les pays de la région. La présente publication de la FAO/OMS "manuel d'utilisation des eaux usées traitées" est prévue pour aider les agriculteurs, les opérateurs d'irrigation et les vulgarisateurs qui sont en contact étroit avec les agriculteurs, les irrigants et d'autres utilisateurs en sylviculture et en aménagement.

1.1 Objectifs

La récupération et la réutilisation de l'eau usée s'est avérée être une option réaliste pour couvrir le déficit en eau et les besoins croissants en eau dans les pays du Proche Orient, mais aussi pour se conformer aux règlements relatifs au rejet des eaux usées, en vue de la protection de l'environnement et de la santé publique. En outre, du point de vue environnemental, la récupération et la réutilisation de l'eau usée urbaine traitée pour l'irrigation constituent probablement l'approche d'élimination la plus sûre et la plus réaliste.

Les données de recherche disponibles, l'expérience de gestion et le savoir-faire, accumulés pendant ces dernières années, ont été utilisés dans la préparation de ce manuel. La différence, par rapport aux autres manuels sur le traitement et la réutilisation des eaux usées, réside en ce qu'il est censé fournir aux utilisateurs, en particulier les agriculteurs, des recommandations, des directives et des procédures de gestion afin d'optimiser la production végétale dans une approche respectueuse de l'environnement. À cet égard, ce manuel fournit des mesures préventives intégrées d'une gestion des problèmes potentiels. Plus spécifiquement, le présent manuel a les caractéristiques suivantes:

- Il est écrit d'une manière simple, la littérature dans le texte étant limitée;
- Il présente les aspects légaux, institutionnels et autres avec concision;
- Il développe longuement les aspects agronomiques intéressant l'agriculteur comme l'irrigation, la fertilisation, le choix des cultures, etc.

Les aspects concernant la planification, la conception, l'opération et l'entretien des stations d'épuration des eaux résiduaires ne sont pas couverts. Le manuel suppose que l'eau usée traitée d'une certaine qualité est déjà disponible pour l'irrigation. Il propose, au travers des "Bonnes Pratiques Agricoles" (BMP - Best Management Practices), la manière de réaliser les meilleurs résultats sur une base durable. La FAO espère qu'il contribuera résolument à la réutilisation efficace et sûre de l'eau et qu'il garantira la durabilité en combinant la protection publique et environnementale avec les avantages économiques.

1.2 La demande globale en eau au Proche Orient

Tandis que le Proche Orient couvre 14% de la surface totale du monde et contient environ 10% de sa population, ses ressources en eau équivalent seulement à moins de 2% de toutes les ressources en eau renouvelables dans le monde.

La réutilisation de l'eau usée urbaine n'est pas un nouveau concept. Avec l'augmentation de la demande en eau, liée à l'augmentation de la population et à l'amélioration du niveau de vie, la réutilisation de l'eau usée acquiert un rôle croissant dans la planification et le développement des approvisionnements supplémentaires en eau. C'est particulièrement important pour des pays du Proche Orient puisqu'ils sont la plupart du temps arides ou semi-arides. Ils bénéficient

de faibles précipitations, la plupart du temps saisonnières, et à distribution irrégulière. Par ailleurs, la qualité de l'eau se détériore fortement.

L'utilisation de l'eau usée en irrigation a été pratiquée, bien que sans contrôle, dans beaucoup de pays de la région. En 1997, on estimait à 1 200 millions de m³/an la quantité d'eau usée traitée, utilisée pour l'irrigation dans des pays du Proche-orient (tableau 1). Dans plusieurs pays de la région, l'approvisionnement adéquat en eau se trouve confronté à des problèmes croissants et de nouvelles approches, telles que le dessalement et la réutilisation d'eau usée, sont adoptées. Ceci aidera à résoudre partiellement le problème de la pénurie de l'eau et à faire face au problème environnemental impérieux du rejet des eaux usées. Dans plusieurs pays du Proche Orient, le besoin d'eau est bien plus aigu et pressant. Pour cette raison, le traitement des eaux résiduaires et leur réutilisation devient une nécessité. Cependant, la protection de la santé publique et de l'environnement sont des préoccupations associées à la réutilisation, qui n'ont pas été sérieusement considérées dans un certain nombre de pays. La santé et les risques globaux devraient se situer dans des limites acceptables afin de sauvegarder la santé publique et protéger l'environnement.

Tableau 1. Pays du Proche Orient utilisant les plus grandes quantités d'eau usée traitée (Aquastat, FAO, 1997)

| Country | Eau usée traitée 10 ⁶ m ³ /an | En % du total | En % de l'eau prélevé dans le pays |
|---------------------|--|---------------|---------------------------------------|
| Egypte | 200 | 16.7 | 0.36 |
| Koweit | 52 | 4.3 | 9.67 |
| Arabie Saoudite | 217 | 18.1 | 1.28 |
| Syrie | 370 | 30.8 | 2.57 |
| Emirats Arabes Unis | 108 | 9.0 | 5.12 |
| Autres 24 pays | 253 | 21.1 | 0.06 |
| Total Proche Orient | 1 200 | 100.0 | 0.23 |

1.3 Avantages et limites de la réutilisation de l'eau usée

L'eau usée et d'autres eaux de mauvaises qualités sont importantes dans le contexte de la gestion globale des ressources en eau. En libérant des ressources d'eau douce pour l'approvisionnement domestique et d'autres usages prioritaires, la réutilisation apporte une contribution à la conservation de l'eau et de l'énergie et améliore la qualité de la vie. L'eau usée peut avoir des résultats agronomiques positifs. D'ailleurs, les systèmes d'utilisation d'eau usée, lorsqu'ils sont correctement planifiés et contrôlés, peuvent avoir un impact environnemental et sanitaire positif, à côté de rendements agricoles accrus. Cependant, la

réutilisation de l'eau usée peut également avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé publique.

2 EVALUATION DE LA QUALITE DE L'EAU USEE TRAITEE POUR L'IRRIGATION

L'eau usée est unique du point de vue composition. Les constituants physiques, chimiques et biologiques qui s'y trouvent doivent être pris en considération. Dans ce chapitre, les problèmes sont brièvement présentés ; par contre, les solutions sont mises en évidence. Quelques approches intégrées de gestion seront présentées afin d'atténuer et/ou surmonter ces problèmes.

2.1 Caractéristiques chimiques et physiques des eaux usées

Les constituants importants dans l'eau usée sont donnés en annexe I. Il reste que pour une approche de gestion appropriée, les constituants principaux qui préoccupent les agriculteurs des pays du Proche Orient sont :

- **les matières solides** en suspension, puisque la filtration peut être nécessaire, en particulier avec des systèmes de micro-irrigation;
- **les nutriments** afin d'ajuster la fertilisation;
- **la salinité** afin d'estimer la fraction de lessivage et sélectionner les cultures les mieux appropriées;
- **les micro-organismes pathogènes** pour les mesures de précaution, en choisissant le modèle d'emblavement et le système d'irrigation appropriés.

2.1.1 Traitement des eaux résiduaires

L'objectif principal du traitement est de produire des effluents traités à un niveau approprié et acceptable du point de vue du risque pour la santé humaine et l'environnement. À cet égard, le traitement des eaux résiduaires le plus approprié est celui qui fournit, avec certitude, des effluents de qualité chimique et microbiologique exigée pour un certain usage spécifique, à bas prix et des besoins d'opération et d'entretien minimaux. Les stations d'épuration des eaux résiduaires, indépendamment du type de traitement, réduisent la charge organique et les solides en suspension et enlèvent les constituants chimiques des eaux usées qui peuvent être toxiques aux récoltes ainsi que les constituants biologiques (microbes pathogènes) qui concernent la santé publique en général.

Les différents degrés de traitements conventionnels sont :

- **le traitement préliminaire.** Enlèvement des solides grossiers et d'autres grands fragments de l'eau usée brute.
- **le traitement primaire.** Enlèvement des solides organiques et inorganiques sédimentables ainsi que les matériaux flottants.
- **le traitement secondaire.** Enlèvement des matières organiques solubles et des matières en suspension des eaux usées traitées primaires.
- **le traitement tertiaire et/ou avancé.** Enlèvement de constituants spécifiques de l'eau usée tels que les nutriments et les métaux lourds, qui ne sont pas enlevés par le traitement secondaire. La désinfection, habituellement avec du chlore, est employée pour réduire les constituants microbiologiques.

Le traitement biologique naturel le plus largement répandu est le lagunage (ou étangs de stabilisation), qui peut être conçu pour réaliser différents degrés de traitement des eaux usées. Le système se compose de trois phases :

- **les bassins anaérobies**, ayant normalement des berges en terre, d'une profondeur comprise entre 2 et 5 m, fonctionnant comme une fosse septique ouverte et produisant du gaz libéré dans l'atmosphère;
- **les bassins facultatifs**, également formés de berges en terre, où des réactions biologiques aérobies peuvent avoir lieu dans la couche moyenne par les bactéries facultatives;
- **les bassins de maturation**, produisant un traitement tertiaire et une réduction des microbes pathogènes plus poussée.

2.1.2 Traitement et considérations de la qualité des eaux usées

Dans une approche intégrée du traitement et de l'utilisation des eaux usées en irrigation, la fiabilité du traitement et le contrôle continu sont fortement recommandés puisque ceux-ci sont hors contrôle de l'agriculteur. Dans la planification et l'exécution de nouveaux projets d'épuration et de réutilisation des eaux usées, l'application prévue de réutilisation devrait régir le degré de traitement exigé et la fiabilité du processus de traitement des eaux résiduelles et de l'exploitation de la station d'épuration. Cependant, dans les stations d'épuration existantes, la qualité de l'effluent traité est déjà connue et les agriculteurs sont obligés de modifier leur pratique en fonction de la qualité de l'eau qui leur est fournie. En général, dans les pays du Proche Orient, il n'y a pas du tout d'intervention au sujet de la composition chimique de l'eau usée traitée. À cet égard, les approches de gestion proposées aux agriculteurs pour alléger les problèmes potentiels sont la plupart du temps présentées et discutées.

2.1.3 Critères de qualité des eaux usées pour l'irrigation

Les caractéristiques de qualité chimique et physique sont identiques pour n'importe quelle eau d'irrigation. À cet égard, les directives générales présentées dans le tableau 2 peuvent être employées pour évaluer l'eau usée traitée, utilisée à des fins d'irrigation, en termes de constituants chimiques tels que les sels dissous, le contenu en sodium et les ions toxiques. La procédure demeure la même qu'avec les autres types d'eaux.

Salinité

Dans la plupart des pays, l'eau utilisée pour l'approvisionnement municipal est l'eau ayant la meilleure qualité disponible et elle est habituellement de faible salinité. Cependant, en conditions de pénurie en eau, la salinité peut être un problème. La quantité et le type de sels présents sont importants pour évaluer si l'eau usée traitée convient pour l'irrigation. Des problèmes potentiels sont liés à la teneur en sels totaux, au type de sel ou à la concentration excessive d'un ou plusieurs éléments (Ayers et Westcot, 1985).

Tableau 2. Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation (FAO 1985)

| Problèmes Potentiels en Irrigation | Unités | Degré de restriction à l'usage | | |
|--|-------------------------|--------------------------------|----------------|--------|
| | | Aucun | Léger à modéré | Sévère |
| Salinité | | | | |
| EC _w ¹ | dS/m | < 0.7 | 0.7 - 3.0 | > 3.0 |
| ou TDS | mg/l | < 450 | 450 – 2000 | > 2000 |
| Infiltration | | | | |
| SAR ² =0 - 3 et EC _w = | dS/m | > 0.7 | 0.7 - 0.2 | < 0.2 |
| =3 – 6 = | | > 1.2 | 1.2 - 0.3 | < 0.3 |
| =6 – 12 = | | > 1.9 | 1.9 - 0.5 | < 0.5 |
| =12 – 20 = | | > 2.9 | 2.9 - 1.3 | < 1.3 |
| =20 – 40 = | | > 5.0 | 5.0 - 2.9 | < 2.9 |
| Toxicité Spécifique des ions | | | | |
| Sodium (Na) | | | | |
| Irrigation de surface | SAR | < 3 | 3 – 9 | > 9 |
| Irrigation par aspersion | méq/l | < 3 | > 3 | |
| Chlorure(Cl) | | | | |
| Irrigation de surface | méq/l | < 4 | 4 – 10 | > 10 |
| Irrigation par aspersion | méq/l | < 3 | > 3 | |
| Bore (B) | | | | |
| | mg/l | < 0.7 | 0.7 - 3.0 | > 3.0 |
| effets divers | | | | |
| Azote (NO ₃ -N) ³ | mg/l | < 5 | 5 – 30 | > 30 |
| Bicarbonate (HCO ₃) | méq/l | < 1.5 | 1.5 - 8.5 | > 8.5 |
| pH | Gamme normale 6.5 - 8.4 | | | |

¹ EC_w signifie la conductivité électrique en deciSiemens par mètre à 25°C.

² SAR signifie le taux d'adsorption de sodium (sodium adsorption ratio).

³ NO₃ -N signifie l'azote sous forme de nitrate rapporté en terme d'azote élémentaire. NH₄-N et N-organique devraient être également examinés dans les eaux usées.

➤ **pour surmonter le problème de la salinité au niveau de la ferme, plus d'importance doit être donnée aux approches suivantes :**

a) **Choisir des cultures tolérantes à la salinité de l'eau usée.** Le tableau 3 peut aider les agriculteurs à choisir le système de culture le plus approprié en fonction de la salinité de l'eau usée et de la tolérance des cultures en sels. Avec une salinité inférieure à 3 dS/m et une bonne gestion, la plupart des fruits et des légumes peuvent être produits. Lorsque la salinité augmente, le choix des cultures devient difficile et, excepté certains légumes, le choix est la plupart du temps limité aux fourrages verts.

b) **Choisir des cultures tolérantes au sel ayant la capacité d'absorber des quantités élevées de sels** sans subir d'effets toxiques particuliers (cultures extractrices de sels). En cas d'irrigation avec une eau usée traitée de salinité élevée, dans les zones à pluviométrie limitée et lessivage naturel favorable, des cultures extractrices de sels peuvent aider à réduire l'accumulation de sels dans le sol et permettre ainsi une réutilisation durable à long terme. Les cultures recommandées sont le sudax, le sorgho, le chiendent pied de poule et l'orge.

Tableau 3. Tolérance à la salinité de quelques plantes cultivées (adapté de FAO, 1985)

| Conductivité électrique de l'eau d'irrigation (dS/m, et mg/l)* | | | | | |
|--|------------------|------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| <2 <1280 | 2-3 1280-1920 | 3-4 1920-2560 | 4-5 2560-3200 | 5-7 3200-4480 | >7 >4480 |
| Citrus | Figues | Sorgho | Soja | Carthame | Coton |
| Pommes | Olives** | Arachide | Palmier dattier*** | Blé | Orge |
| Pêche | Brocoli | Riz | Phalaris aquatique | Betterave sucrière | Agropyre |
| Raisins | Tomates | Betteraves | Trèfle | Rye Grass | |
| Fraise | Concombre | Fétuque | Artichauts | Orge des rats | |
| Pommes de terre | Cantaloup | | | Chiendent pied de poule | |
| Poivrons | Pastèques | | | Sudax (sorgho hybride) | |
| Carottes | Epinards | | | | |
| Oignons | Vesce commune | | | | |
| Haricot | Sorgho du Soudan | | | | |
| Maïs | Luzerne | | | | |

* 1dS/m = 640 mg/l

** des niveaux de EC beaucoup plus élevés ont été rapportés (jusqu'à 6 dS/m) pour des olives en Tunisie

*** des niveaux plus élevés de EC ont été également rapportés pour des palmiers dattiers en Algérie (jusqu'à 7-8 dS/m). G. Abdel-Gawad, Acsad

c) Choisir un système d'irrigation permettant une application uniforme de l'eau, une efficacité élevée et offrant la possibilité d'irriguer fréquemment. Avec les systèmes d'irrigation pressurisés, en particulier avec les systèmes goutte-à-goutte et mini sprinklers, le niveau admissible de salinité des cultures irriguées peut être plus élevé. Avec de tels systèmes, les directives concernant la tolérance à la salinité des cultures (Maas, 1974) sont seulement des évaluations sommaires. De meilleurs rendements peuvent être obtenus avec ces niveaux critiques lorsqu'on emploie de façon appropriée les systèmes d'irrigation modernes (Goldberg et al., 1971; Papadopoulos et al., 1987).

d) Programmer les irrigations. Le volume d'eau d'irrigation et la fréquence d'application sont deux facteurs déterminants pour contrôler la salinité. Avec des systèmes goutte à goutte, l'irrigation peut être plus fréquente et la salinité du sol à proximité de la plante irriguée peut ainsi être maintenue à un niveau plus bas.

e) Le lessivage est une pratique régulièrement utilisée par les agriculteurs mais n'est probablement pas la meilleure solution en cas de pénurie d'eau, de drainage insuffisant ou de nappe peu profonde. A long terme, la quantité totale de sels appliquée dans le sol avec les eaux usées (sel 'in') et la quantité de sels éliminée par lessivage et prélevée par les cultures, (sel 'out') devraient être approximativement identiques. La sélection de l'assolement cultural et la gestion efficace de l'eau usée en irrigation interviennent de façon importante dans l'élimination des sels (Papadopoulos, 1991). Les cultures extractrices de sels qui ont une valeur économique comme le sudax (sorgho hybride) et le sorgho donnent de bons résultats. Il est recommandé de cultiver des cultures consommatrices de sels chaque année ou périodiquement.

f) Des polymères et/ou d'autres conditionneurs de sol efficaces sous certaines conditions en cultures de plein champ ne sont pas recommandés. Leur demi vie est habituellement courte et leur prix élevé.

g) Drainage. Une des mesures nécessaires pour prévenir la remontée de la nappe et la salinisation induite par l'irrigation en régions arides et semi-arides est l'installation d'un réseau de drainage. Le drainage, en combinaison avec une irrigation appropriée permet le lessivage des sels en excès hors de la zone racinaire.

Alcalinité

La dispersion de la phase colloïdale du sol, la stabilité des agrégats, la structure du sol et la perméabilité à l'eau sont toutes très sensibles aux types d'ions échangeables présents dans l'eau d'irrigation. L'augmentation de l'alcalinité du sol, qui peut se produire avec l'eau usée traitée à cause de la concentration élevée en Na, réduit la perméabilité du sol, particulièrement en surface, même si le lessivage a lieu. Ce phénomène est lié à la dispersion et au gonflement des argiles lorsque la concentration en Na échangeable augmente. Toutefois, pour une certaine valeur du Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR – Sodium Adsorptio Ratio), la vitesse d'infiltration augmente ou diminue avec le niveau de salinité. Par conséquent, le SAR et EC_w (salinité) devraient être employés en association pour évaluer les problèmes potentiels éventuels (Rhoades, 1977).

➤ **les solutions suivantes de gestion sont recommandées :**

a) Amendements chimiques. L'utilisation d'amendement calcique, tel que le gypse, est largement admise pour l'amélioration des sols ayant un pourcentage élevé en Na par rapport à la capacité d'échange cationique (CEC) ou chaque fois que de l'eau à haut SAR est utilisée pour l'irrigation. Le sodium du sol est échangé par le calcium du gypse et la dispersion de la phase colloïdale se réduit. L'application du gypse devrait être répétée périodiquement en fonction du contenu en Na de l'eau et à la CEC du sol. Les agriculteurs doivent s'informer auprès des professionnels pour estimer la quantité et la fréquence d'application du gypse.

b) Système d'irrigation adapté. La formation de croûte à la surface de sol est le résultat de l'irrigation avec de l'eau à SAR élevé. Le degré de gravité du problème, cependant, n'est pas le même avec tous les systèmes d'irrigation. En général, les systèmes d'irrigation de surface avec de l'eau à SAR élevé créent une croûte de surface épaisse. Des résultats identiques sont obtenus avec des arroseurs à haut débit. La perméabilité du sol ainsi que son aération et la germination des graines en sont affectées. Avec des mini-arroseurs et des goutteurs de faible débit, la formation de croûte en surface est réduite, la durée de l'irrigation est prolongée et l'eau peut pénétrer lentement dans le sol (Papadopoulos et Stylianou, 1988a).

c) Matière organique. Le problème d'alcalinité peut également être résolu par l'addition de matière organique comme la paille, d'autres déchets végétaux et du fumier organique.

Toxicité spécifique des ions

Les ions les plus toxiques rencontrés généralement dans l'eau usée traitée sont le sodium (Na), le chlorure (Cl) et le bore (B) qui cause la plupart des cas courant de toxicité. Le bore est un des éléments essentiels aux cultures; cependant, les concentrations de B excédant 0,5 mg/l peuvent être toxiques aux cultures sensibles (tableau 4).

➤ **les mesures recommandées pour surmonter la toxicité des ions :**

- Avec des cultures sensibles au bore, il est difficile d'apporter des corrections sans changer la culture ou l'approvisionnement en eau (Ayers, 1977). Pour de l'eau contenant des teneurs élevées en bore, il est nécessaire de choisir des cultures qui peuvent tolérer cette concentration.
- Le lessivage peut aider à maintenir la concentration en bore dans le sol à un niveau comparable à celui d'une eau classique utilisée pour l'irrigation (Bernstein et François, 1973). Selon le sol, une certaine quantité supplémentaire d'eau d'irrigation est

- habituellement ajoutée aux besoins d'eau d'irrigation estimés
- Les irrigations fréquentes diluent le bore dans la solution du sol.
 - Avec l'utilisation de la micro-irrigation, l'application de l'eau pourrait être plus uniforme et la fréquence des irrigations pourrait également être contrôlée.

Tableau 4. Tolérances relatives des plantes au bore dans l'eau d'irrigation (adapté d'Ayers, 1977)

| Sensible (1 mg/l) | Semi tolérant (2 mg/l) | Tolérant (3 mg/l) |
|-------------------|------------------------|-------------------|
| Citrus | Haricot | Carotte |
| Avocat | Paprika | Laitue |
| Abricot | Tomate | Chou |
| Pêche | Maïs | Oignon |
| Cerise | Olives | Betterave à sucre |
| Raisin | Radis | palmier dattier |
| Pomme | Potiron | Asperge |
| Poire | Blé | Navet |
| Prune | Pomme de terre | |
| Fraise | Tournesol | |

Le chlorure (Cl) et le sodium (Na) sont moins toxiques que le bore. Dans les régions arides et semi-arides l'eau usée traitée peut avoir une concentration élevée en Cl et Na à cause du contenu relativement élevé en ces éléments dans les eaux domestiques. Avec une gestion appropriée de l'irrigation (système d'irrigation, fréquence d'irrigation, lessivage), les effets toxiques peuvent être réduits significativement, à des niveaux ne présentant aucune vraie contrainte pour la réutilisation.

Eléments traces et métaux lourds

C'est le problème principal avec la réutilisation des eaux usées traitées dans les pays ayant une industrie lourde. Les métaux qui peuvent être présents dans les eaux résiduaires {cadmium (Cd), cuivre (Cu), molybdène (Mo), nickel (Ni) et zinc (Zn)} peuvent constituer un risque sanitaire significatif pour les humains et les animaux et peuvent également affecter les cultures irriguées. Ces métaux, dans la plupart des cas, s'accumulent dans la plante et peuvent affecter de façon défavorable les humains ou les animaux domestiques se nourrissant de ces plantes. Pour cette raison, beaucoup de pays développés ont établi des charges maximum admissibles en métaux lourds sur les terres agricoles. Le problème des métaux lourds est discuté plus en détail en liaison avec les boues résiduaires. Biswas (1987) a rapporté la charge en métaux lourds admise sur les terres agricoles dans quelques pays européens (tableau 5).

Tableau 5. Charge maximum en éléments traces permise sur les terres agricoles en kg/ha.an (adapté de Biswas, 1987).

| Pays | Cd | Cu | Cr | Pb | Hg | Ni | Zn |
|------------|-----|-----|------|------|-----|----|-----|
| France | 5.4 | 210 | 360 | 210 | 2.7 | 60 | 750 |
| Allemagne | 8.4 | 210 | 210 | 210 | 5.7 | 60 | 750 |
| Pays-Bas | 2.0 | 120 | 100 | 100 | 2.0 | 20 | 400 |
| Angleterre | 5.0 | 280 | 1000 | 1000 | 2.0 | 70 | 560 |

Les concentrations limites recommandées en éléments traces dans les eaux usées épurées destinées à l'irrigation sont présentées au (tableau 6).

Tableau 6. Limites recommandées en éléments traces dans les eaux usées épurées destinées à l'irrigation^a

| Constituant | Utilisation à long terme ^b (mg/l) | Court terme ^c (mg/l) |
|-------------|---|------------------------------------|
| Aluminium | 5.0 | 20.0 |
| Arsenic | 0.10 | 2.0 |
| Béryllium | 0.10 | 0.5 |
| Bore | 0.75 | 2.0 |
| Cadmium | 0.01 | 0.05 |
| Chrome | 0.1 | 1.0 |
| Cobalt | 0.05 | 5.0 |
| Cuivre | 0.2 | 5.0 |
| Fluor | 1.0 | 15.0 |
| Fer | 5.0 | 20.0 |
| Plomb | 5.0 | 10.0 |
| Lithium | 2.5 | 2.5 |
| Manganèse | 0.2 | 10.0 |
| Molybdène | 0.01 | 0.05 |
| Nickel | 0.2 | 2.0 |
| Sélénium | 0.02 | 0.02 |
| Vanadium | 0.1 | 1.0 |
| Zinc | 2.0 | 10.0 |

^a Adapté de: Académie nationale des sciences - National Academy of Engineering (1973)

^b Pour l'eau utilisée sans interruption sur tous les sols

^c Pour l'eau utilisée pendant une période d'au plus 20 ans sur des sols de texture fine, neutres ou alcalins

➤ **Réflexions et aspects de gestion concernant les éléments traces et les métaux lourds**

La question pour des pays du Proche-orient est de savoir si les métaux lourds représentent un problème sanitaire et/ou écologique sérieux. En général, les métaux lourds et les éléments traces ne devraient pas être considérés comme un problème extrême ou sérieux pour deux raisons principales :

- la concentration des métaux lourds dans l'eau usée urbaine est faible à cause de la faible activité industrielle lourde,
- les sols de la région ont la plupart du temps une forte concentration en CaO₃ et un pH supérieur à 7, ce qui inactive les métaux lourds et diminue leur mobilité et leur disponibilité pour les cultures. Dans ces conditions, les métaux sont rendus indisponibles et des valeurs de charge et de concentration plus élevées que celles présentées dans les tableaux 6 et 7 pourraient être acceptées.

Par conséquent :

1. les métaux lourds dans les eaux usées traitées, en conditions de sols calcaires ne devraient pas être considérés comme un réel problème et aucune gestion particulière n'est requise;
2. en milieu acide (peu de cas dans la région à pH<7) les métaux lourds pourraient être un problème et les mesures suivantes sont recommandées au niveau de la ferme;
 - Chaulage (utilisation de carbonate de calcium). De cette façon, le pH du est augmenté et la solubilité des métaux lourds est ainsi réduite.
 - Eviter l'emploi d'engrais acides.

- Utiliser des cultures tolérantes à certains métaux lourds.
- Utiliser des cultures n'ayant pas de propriété de bio-amplification (accumulation de certains métaux lourds par des plantes spécifiques ou dans certaines parties de la plante).

Les agriculteurs devraient être encouragés à consulter des professionnels avant de prendre la décision finale sur les mesures nécessaires.

Fertilisants dans les eaux usées traitées

Le potentiel de fertilisation de l'eau usée traitée due à la présence de nutriments est un atout pour les cultures mais peut également être une source de pollution pour l'environnement, en fonction principalement de la gestion des eaux usées appliquées par les agriculteurs. Les nutriments constituent une caractéristique spécifique de l'eau usée traitée qui intéresse particulièrement les agriculteurs. Pour cette raison, un code de bonnes pratiques agricoles en matière de fertilisation est développé et présenté dans ce manuel. Il est supposé donner une nouvelle dimension à l'utilisation raisonnée, profitable et saine de l'eau usée traitée utilisée en irrigation.

Valeur nutritive de l'eau usée traitée

Les solides en suspension et les éléments colloïdaux et dissous présents dans l'eau usée contiennent des macro- et des micronutriments qui sont essentiels à la nutrition des plantes. Cependant, la teneur nutritive de l'eau usée peut excéder les besoins de la plante et constitue ainsi une source potentielle de pollution des eaux de nappe. Elle peut également poser des problèmes liés à un développement végétatif excessif, en retardant la maturité ou en réduisant la qualité des cultures irriguées. Il est donc nécessaire de considérer les nutriments présents dans l'effluent traité en tant qu'élément du programme global de fertilisation des cultures irriguées. À cet égard, l'analyse d'eau usée est requise au moins une fois au début de la saison culturale.

Les nutriments se trouvant en grandes quantités dans l'eau usée, et qui sont importants en agriculture et en gestion des paysages sont l'azote, le phosphore et parfois le potassium, le zinc, le bore et le soufre. D'autres macro- et micronutriments peuvent également être présents. En outre, la présence de matière organique dans l'eau usée peut, par son effet à long terme sur la fertilité du sol, contribuer également à la stabilité structurale du sol.

Pour l'évaluation correcte de la capacité nutritive de l'eau usée, basée sur son analyse chimique, les valeurs reprises dans le tableau 7 pourraient être employées.

Tableau 7. Apport de nutriments pour diverses quantités d'eau d'irrigation appliquées

| Eau d'irrigation m ³ /ha.an | Concentration d'un nutriment dans les eaux usées (mg/l) | | | | | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 |
| | Quantité de nutriments ajoutée (kg/ha.an) | | | | | | | | |
| 1000 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 |
| 2000 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| 3000 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 150 |
| 4000 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 200 |
| 5000 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 250 |
| 6000 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 300 |
| 7000 | 35 | 70 | 105 | 140 | 175 | 210 | 245 | 280 | 350 |
| 8000 | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 400 |
| 9000 | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 | 360 | 450 |
| 10000 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 500 |

Pour certaines cultures, aucun engrais additionnel n'est nécessaire. Par contre, lorsque les engrais sont nécessaires, les eaux usées pourraient être la réponse pour obtenir un rendement élevé de bonne qualité.

La teneur en azote de l'eau usée urbaine après traitement secondaire varie de 20 à 60 mg/l. L'azote dans l'eau usée traitée peut dépasser les besoins des cultures. La connaissance de la concentration en N dans l'eau usée et la gestion appropriée de la charge en NPK sont essentielles pour surmonter les problèmes associés à une éventuelle concentration élevée en N.

Le phosphore dans l'eau usée après traitement secondaire varie de 6 à 15 mg/l (15-35 mg/l P₂O₅) à moins qu'un traitement tertiaire l'élimine. L'évaluation de P dans l'eau usée traitée devrait être réalisée en concomitance avec les analyses de sol pour les conseils de fumure.

Le potassium contenu dans l'eau usée n'occasionne pas d'effet nuisible sur les plantes ou l'environnement. C'est un macronutriment essentiel qui affecte favorablement la fertilité du sol, le rendement des cultures et leur qualité. La concentration en K dans l'eau usée traitée secondaire varie de 10 à 30 mg/l (12-36 mg/l K₂O). Cette quantité doit être prise en compte pour préparer le programme de fertilisation en fonction des besoins des cultures.

Autres nutriments. La plupart des eaux usées contiennent habituellement des concentrations adéquates en soufre, zinc, cuivre et autres micronutriments. Une attention particulière doit être portée au bore. L'eau usée traitée contient assez de bore pour corriger toutes les déficiences en cet élément. Cependant, lorsque cet élément se trouve en excès, il peut provoquer des problèmes de phytotoxicité. Le tableau 4 peut aider les agriculteurs à choisir des cultures en fonction de leur tolérance au bore. Pour surmonter le problème de B, les mesures correctives similaires aux sels fortement solubles sont recommandées (choix de la culture, lessivage, programme des irrigations, et système d'irrigation). En général, au sujet du bore, les agriculteurs devraient se rappeler ceci:

- les arbres fruitiers sont plus sensibles au B que les légumes,
- en cas de concentration relativement élevée de B dans les eaux usées, les cultures annuelles doivent être privilégiées.

Charge nutritive en NPK

La concentration en N et P dans les eaux usées traitées secondaires peut varier sensiblement selon la source d'eau usée primaire et le procédé de traitement. Les concentrations en N et P des installations de traitement conventionnelles, sont habituellement plus élevées qu'en lagunages aérés et en fossés d'oxydation. En général, N et P sont réduits par le traitement mais la concentration en K reste approximativement identique au niveau trouvé dans l'eau usée brute.

Les quantités en N, P et K appliquées par hectare avec une irrigation de 1000 mm d'eau usée ayant une concentration telle que montrée au tableau 8 sont donnés dans ce même tableau. Évidemment, l'apport en nutriments dépend de la quantité totale d'eau usée appliquée. Il est évident que pour avoir une efficacité nutritive élevée, l'irrigation devrait être basée sur les besoins en eau des cultures.

Tableau 8. Potentiel de fertilisation par l'eau usée (FAO/RNEA, 1992)

| | N | P | K |
|---|----------|----------|----------|
| Concentration en nutriments (mg/l) | 40 | 10 | 30 |
| Nutriments apportés annuellement par l'application de | | | |

| | | | |
|--|-----|-----|-----|
| 10 000 m ³ d'eau/ha (1000 mm) | 400 | 100 | 300 |
|--|-----|-----|-----|

De telles quantités d'engrais fournissent la totalité ou plus de N normalement requise pour certaines cultures ainsi qu'une grande partie du P et du K. A cet égard, chaque culture doit être considérée séparément pour estimer les besoins en éléments fertilisants supplémentaires. Dans certains cas, les nutriments dans l'eau usée peuvent être en quantité supérieure à celle nécessaire à la croissance équilibrée des cultures et peuvent potentiellement stimuler une croissance excessive des parties végétatives des cultures plutôt que les fleurs et les graines. Cela peut être un problème pour des cultures comme le tournesol, le coton et quelques fruits. En cas d'excès de nutriments, un système de culture et/ou un mélange appropriés d'eau usée traitée à de l'eau douce, pour réduire l'application de fertilisants, sont des méthodes conseillées.

➤ Contrôle du problème de l'excès en N dans l'eau usée

a) Estimer la concentration de N. L'analyse chimique de l'N élémentaire est requise. Sur la base de cette analyse, l'agriculteur pourrait calculer la quantité d'N supplémentaire à apporter au sol par l'utilisation d'eau usée. Cette quantité devrait être soustraite de la quantité d'engrais nécessaire aux cultures. Pour une évaluation facile, le fermier devrait se rappeler que :

1 ppm (partie par million) = 1 mg/l = 1 g/m³ dans l'eau d'irrigation

Par conséquent, la quantité d'N et d'autres nutriments appliqués au sol avec l'eau usée dépend de la quantité d'eau d'irrigation apportée à la culture. Les agriculteurs devraient être formés aux techniques d'irrigation avec des eaux usées.

b) Choisir la culture en fonction du contenu en N des eaux usées. Le choix de la culture en fonction du contenu en N des eaux usées traitées est nécessaire pour deux raisons :

- **faire la meilleure utilisation possible de l'N des eaux usées.**

Si la quantité d'azote présente dans l'eau usée n'est pas suffisante, un supplément d'engrais est alors nécessaire pour atteindre un rendement cultural satisfaisant. En application à long terme de l'eau usée, les apports d'N devraient être ajustés pour compenser le prélèvement de N par la récolte, augmentés des pertes du système par volatilisation et lixiviation. Les besoins des cultures en N, P et K sont donnés dans les chapitres suivants.

- **Eviter la pollution par les nitrates.**

Certaines cultures sont très efficaces pour prélever l'azote du sol, qui peut éventuellement être lessivé en profondeur sous forme de NO₃-N et contaminer l'eau de la nappe. Les graminées telles que l'herbe du Soudan (sorgho herbacé – *Sorghum vulgare var. sudanense*), l'herbe des Bermudes (chiendent pied-de-poule – *Cynodon dactylon*), l'herbe de Sudax (sorgho hybride), et de Rhodes prélèvent efficacement l'N du sol. Ces cultures sont efficaces dans l'élimination des nitrates pour les raisons suivantes:

- elles ont la capacité d'accumuler le nitrate;
- plusieurs coupes sont possibles dans une saison, de sorte qu'une plus grande production de la culture peut être atteinte;
- leur contenu en nitrate ne diminue pas avec l'âge;
- ce sont des cultures à enracinement profond.

c) Établissement du programme de l'irrigation. Etant donné que les nutriments sont régulièrement présents dans l'eau usée traitée, toute quantité d'eau d'irrigation qui dépasse les besoins de la culture peut créer un problème. Le problème peut être environnemental et/ou agronomique. Les agriculteurs doivent se rappeler que l'irrigation avec de l'eau usée requiert le

suivi strict du programme d'irrigation.

▪ **Quantité d'eau.**

Les cultures doivent être irriguées selon leurs besoins en eau. On pourrait noter, que puisque la quantité d'eau d'irrigation diffère d'un endroit à l'autre, à cause des conditions climatiques, les nutriments dans l'eau usée peuvent s'y trouver en excès ou en concentration inadéquate pour une même culture dans des conditions de fertilité du sol identiques. De même, des eaux usées de même qualité peuvent avoir des impacts environnementaux défavorables en un endroit et être adéquats autre part. Pour cette raison, il est difficile de donner des valeurs absolues pour la fertilisation avec l'eau usée, contrairement à ce qui se passe avec l'eau claire.

▪ **Fréquence des irrigations.**

Les agriculteurs doivent également savoir qu'en pleine période de croissance, la quantité d'eau d'irrigation doit toujours être identique et atteindre la profondeur où les racines actives sont concentrées. Cependant, comme la quantité absolue d'eau d'irrigation change avec les conditions climatiques, la fréquence des irrigations doit varier, alors que la dose d'irrigation doit rester constante.

d) Système d'irrigation. Pour éviter la pollution par les nitrates, le système d'irrigation doit appliquer l'eau uniformément. Évidemment, plus l'efficacité du système d'irrigation est élevée, plus grande sera l'efficacité d'absorption de l'N par les cultures et plus faible sera le potentiel de pertes et de pollution par les nitrates. La micro-irrigation conçue, installée et contrôlée de façon appropriée, fournit l'efficacité d'irrigation la plus élevée. En irrigation à la raie, les agriculteurs sont conviés à créer des raies courtes, spécialement si le nivellement au laser n'est pas possible.

e) Mélange d'eau usée traitée avec de l'eau claire si elle est disponible

Autres problèmes

Une attention particulière doit être portée aux constituants de l'eau usée traitée qui peuvent obstruer les systèmes d'irrigation. Le colmatage des asperseurs, des micro-asperseurs et des goutteurs peut engendrer un problème sérieux. L'accumulation (dépôts biologiques, bactéries, etc.) dans les arroseurs, les canalisations d'alimentation, les orifices de distribution, peut causer un colmatage tout comme une concentration importante en algues et en matières en suspension. Les problèmes de colmatage les plus sérieux se produisent avec les systèmes goutte à goutte. Une filtration peut être requise juste avant irrigation. Ceci entraîne que la gestion du système d'irrigation goutte à goutte utilisant l'eau usée traitée a besoin de plus d'assistance.

➤ **les solutions suggérées pour résoudre le problème de colmatage sont :**

- Pour éviter les problèmes dus aux algues en suspension qui s'accumulent à la surface de l'eau et aux problèmes dus à l'accumulation de boues au fond du réservoir, l'eau doit être pompée à une profondeur d'environ un mètre de la surface.
- Filtration. En fonction de la concentration des solides en suspension, des algues et d'autres impuretés, des filtres à gravier, à sable ou autres sont requis avec les systèmes de micro-irrigation.
- Choix de la méthode d'irrigation. En cas d'impuretés et en l'absence de système de filtration, les systèmes goutte à goutte devraient être évités. Selon la culture, les arroseurs peuvent être un meilleur choix. Même l'irrigation de surface pourrait être préférée.

2.2 Critères de qualité biologique

Les critères de qualité de l'eau usée traitée et les directives de son utilisation sont les bases essentielles d'une installation réussie de tout projet de recyclage d'eau usée traitée. La qualité microbiologique est le critère le plus important pour les ouvriers qui travaillent au champ ainsi que pour le public qui peut être exposé directement ou indirectement à l'eau usée épurée. Une réutilisation restrictive ou non restrictive peut être adoptée en fonction de la qualité microbiologique. Dans ce manuel, les critères microbiologiques de qualité ne sont pas développés. On suppose que chaque pays possède des directives et/ou règlements auxquels les agriculteurs doivent obligatoirement se conformer. Les agriculteurs doivent cependant être informés de ces directives comme de la qualité de l'eau usée qui leur est fournie, de façon à appliquer une gestion appropriée dans des limites de risques acceptables pour la santé et l'environnement. Les pays qui n'ont pas encore développé leurs directives nationales sont encouragés adopter celles de l'OMS (tableau 9). Il est à noter que chaque pays devrait avoir ses propres directives et ses codes de bonnes pratiques. Dans ce contexte, les directives utilisées à Chypre sont présentées comme exemple (annexe II).

Tableau 9. Directives de qualité microbiologique recommandée pour l'usage d'eau usée en agriculture (OMS, 1989)¹

| Caté-gorie | Conditions de réalisation | Groupe exposé | Nématodes intestinaux ^a (nbre d'oeufs/litre) moyenne arithmétique | Coliformes intestinaux (nbre par 100 ml) moyenne ^b géométrique | Procédé de traitement susceptible d'assurer la qualité microbiologique voulue |
|------------|---|---|--|---|--|
| A | Irrigation de cultures destinées à être consommées crues, des terrains de sport, des jardins publics ^c | Ouvriers agricoles consommateurs public | Maximum 1 | Maximum 1.000 ^d | Une série de bassins de stabilisation conçus de manière à obtenir la qualité microbiologique voulue ou tout autre procédé de traitement équivalent |
| B | Irrigation des cultures céréalières, industrielles et fourragères, des pâturages et des plantations d'arbres ^e | Ouvriers agricoles | Maximum 1 | Aucune norme n'est recommandée | Rétention en bassins de stabilisation pendant 8-10 jours ou tout autre procédé d'élimination des helminthes et des coliformes intestinaux |
| C | Irrigation localisée des cultures de la catégorie B. si les ouvriers agricoles et le public ne sont pas exposés | Néant | Sans objet | Sans objet | Traitement préalable en fonction de la technique d'irrigation, mais au moins sédimentation primaire |

(Source : OMS, 1989)

^a Espèces *Ascaris* et *Trichuris* et ankylostomes.

^b Pendant la période d'irrigation.

^c Une directive plus stricte (< 200 coliformes intestinaux par 100 ml) est justifiée pour les pelouses avec lesquelles le public peut avoir un contact direct, comme les pelouses d'hôtels.

^d Cette recommandation peut être assouplie quand les plantes comestibles sont systématiquement consommées après une longue cuisson.

^e Dans le cas d'arbres fruitiers, l'irrigation doit cesser deux semaines avant la cueillette et les fruits tombés ne doivent jamais être ramassés. Il faut éviter l'irrigation par aspersion.

2.3 Code de bonnes pratiques

Un code de bonnes pratiques est bien plus important pour les agriculteurs que les directives de qualité de réutilisation des eaux usées. Un code de bonnes pratiques se compose des suggestions et des recommandations, complétant les directives ou les normes, en vue d'aider les agriculteurs à contrôler l'utilisation de l'eau usée dans les meilleures conditions. Le code de bonnes pratiques porte sur la gestion de l'irrigation avec l'eau usée, les systèmes d'irrigation et les méthodes et précautions liées à la culture.

Le code peut être différent d'un pays à l'autre. Un exemple de code, qui complète les directives, est présenté en annexe III. Ce recueil d'instructions est adressé en même temps aux opérateurs du traitement des eaux usées (Sections A et C) et aux agriculteurs (Section B) afin de les guider sur la façon de gérer les eaux usées destinées à l'irrigation, quelle culture choisir, quel système d'irrigation utiliser en fonction du type de culture et de la qualité des eaux usées. L'attention est également attirée sur les mesures conservatoires qui assureront à l'agriculteur une réutilisation saine et de bons résultats économiques. De cette façon, n'importe quel agriculteur sera en position de se protéger, de protéger la population voisine, les consommateurs et l'environnement.

2.4 Préalables à une réutilisation efficiente et efficace

Un programme de fertilisation et d'irrigation correct est le paramètre le plus important pour une irrigation durable à long terme avec l'eau usée. Les analyses de sol et d'eau usée sont nécessaires afin de fixer les conseils de fertilisation. La fertilisation avec l'eau usée est différente de celle recommandée pour l'eau conventionnelle.

2.4.1 Code de bonnes pratiques pour la fertilisation des récoltes irriguées avec l'eau usée traitée: approche étape-par-étape

La fertilisation pourrait être pratiquée empiriquement (arbitrairement) ou sur une base scientifique. L'application empirique des engrais est associée à de sévères limitations, qui mènent à une faible valorisation des engrais par les cultures. En général, la fertilisation empirique est basée sur l'expérience de l'agriculteur et sur des recommandations. L'approche scientifique prend en considération la nutrition de la culture, la fertilité du sol, la teneur en éléments nutritifs de l'eau usée ; et le rendement attendu et fournit des informations personnalisées à chaque agriculteur au sujet des besoins en fertilisants de son champ.

Exigences nutritionnelles et en fertilisants des cultures

Le choix d'un programme raisonné de fertilisation est influencé par la connaissance des besoins nutritifs de la culture, de l'aptitude du sol et de l'eau usée à fournir les éléments nutritifs, de l'efficacité du prélèvement d'éléments nutritifs sous différentes conditions d'irrigation, des méthodes de fertilisation et du rendement attendu. Lorsque le sol et l'eau usée ne fournissent pas la quantité adéquate d'éléments nécessaires à la croissance normale des plantes, il est essentiel que les quantités indispensables soient appliquées.

a) Absorption d'éléments nutritifs par les cultures. La quantité de nutriments exportés du sol par une culture est une bonne information qui peut être utilisée pour optimiser le niveau de fertilisation du sol pour différentes cultures. Une partie des éléments nutritifs prélevés du sol par la culture est employée pour la croissance végétative (couvert végétal) et l'autre pour la production du fruit. La quantité d'éléments fertilisants exportés par la récolte doit être présente dans le sol indépendamment du fait qu'une partie peut rester (racines) ou retourner

(déchets verts) au sol à la fin de la saison de croissance. Une règle importante est d'avoir assez de nutriments, en bonnes proportions, dans le sol pour suppléer aux besoins de la culture pendant toute la saison de croissance. Dans le cas de cultures où juste les fruits sont recueillis, de plus faibles quantités de fertilisants sont prélevées que dans le cas où la totalité de la plante est récoltée. Les quantités approximatives de N, P, K prélevés du sol par de diverses cultures sont indiquées dans le tableau 10. L'absorption variera considérablement selon un certain nombre de facteurs, y compris le niveau de rendement, l'apport nutritif du sol, les méthodes de fertilisation et d'irrigation. Les données du tableau 10 indiquent les besoins comparatifs des cultures. En outre, elles sont une indication de la vitesse avec laquelle la réserve de nutriments "stockés" dans le sol est épuisée par certaines cultures.

Tableau 10. Besoins en éléments fertilisants de certaines cultures pour la formation du couvert végétal et du fruit (adapté de Papadopoulos)

| {PRIVATE }Culture | N | P | K | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
|-------------------------|------|------|------|-------------------------------|------------------|
| Pomme de terre | | | | | |
| couvert végétal (kg/ha) | 86 | 7 | 120 | 16 | 144 |
| tubercule (kg/tonne) | 3.20 | 0.54 | 4.50 | 1.24 | 5.40 |
| Tomate | | | | | |
| couvert végétal (kg/ha) | 95 | 12 | 108 | 27 | 130 |
| fruits (kg/tonne) | 1.80 | 0.17 | 3.13 | 0.38 | 3.75 |
| Aubergine | | | | | |
| couvert végétal (kg/ha) | 105 | 13 | 113 | 30 | 135 |
| fruits (kg/tonne) | 1.96 | 0.17 | 3.2 | 0.40 | 3.8 |
| Poivron | | | | | |
| couvert végétal (kg/ha) | 90 | 6 | 90 | 14 | 108 |
| fruits (kg/tonne) | 2.0 | 0.26 | 1.83 | 0.6 | 2.2 |
| Fraise | | | | | |
| couvert végétal (kg/ha) | 85 | 5 | 88 | 12 | 106 |
| fruits (kg/tonne) | 1.17 | 0.22 | 1.53 | 0.5 | 1.84 |
| Laitue (kg/ha) | 115 | 14 | 160 | 32 | 192 |
| Mangue | | | | | |
| couvert végétal (kg/ha) | 70 | 6 | 108 | 14 | 130 |
| fruits (kg/tonne) | 1.35 | 0.19 | 1.65 | 0.44 | 1.98 |
| Banane | | | | | |
| couvert végétal (kg/ha) | 250 | 26 | 800 | 60 | 1000 |
| fruits (kg/tonne) | 2.0 | 0.22 | 5.0 | 0.5 | 6.0 |
| Citrus | | | | | |
| couvert végétal (kg/ha) | 85 | 8 | 90 | 18 | 108 |
| fruits (kg/tonne) | 1.44 | 0.19 | 1.53 | 0.44 | 1.84 |

Les quantités d'éléments fertilisants indiquées dans tableau 10 doivent nécessairement être disponibles dans le sol. Toutefois, tous les nutriments ne doivent pas nécessairement venir de l'engrais. Une partie est fournie par le sol et une autre partie par l'eau usée. À cet égard, on attire l'attention sur l'importance de l'estimation de la quantité de nutriments disponibles dans le sol (potentiel de fourniture d'éléments nutritifs par le sol) et dans l'eau usée (potentiel de fourniture d'éléments nutritifs par l'eau usée). Ces quantités sont soustraites de la quantité totale, qui doit être fournie par l'apport d'engrais.

b) Éléments fertilisants provenant du sol. Une analyse de sol peut aider pour estimer le potentiel en éléments fertilisants du sol tels que P, K, Ca, Mg et d'autres nutriments. Le lessivage de l'N qui se produit d'emblée pendant la saison pluvieuse ou avec les irrigations, modifie le bilan. Pour cette raison, l'analyse de sol n'est pas utilisée comme outil pour la fertilité du sol en N. Néanmoins, la nitrification peut accumuler les nitrates dans le sol au cours de la saison, lorsque la matière organique est présente. Les analyses de sol mesurent une partie des éléments fertilisants présents dans le sol, supposés ou expérimentalement avérés pour être bien corrélés avec les nutriments disponibles. Les résultats d'analyses du sol sont peu utiles par elles-mêmes. Utiliser une telle mesure pour la prédiction des besoins nutritifs des cultures devrait utiliser les méthodes chimiques, qui ont été testées et calibrées dans le cadre d'expériences de nutrition végétales. D'ailleurs, aucune analyse ne donne de bons résultats si les échantillons de sol ne sont pas représentatifs. Les résultats de l'analyse de sol sont fiables seulement s'ils sont basés sur les échantillons représentatifs. Les problèmes des échantillons représentatifs, des analyses précises, de l'interprétation correcte et des facteurs environnementaux qui influencent la réponse de la culture doivent être considérés. Les analyses de sol aident à réduire les apports irraisonnés d'éléments fertilisants.

Afin d'estimer les apports d'éléments fertilisants d'un sol, les paramètres suivants sont nécessaires:

- profondeur du système racinaire de la culture
- pourcentage (%) de sol occupé par le système racinaire sous différentes conditions d'irrigation,
- poids spécifique apparent du sol (Bd).

Ces paramètres sont nécessaires afin:

1. de calculer le poids de sol de la zone de développement actif des racines,
2. d'estimer les réserves de fertilisants disponibles dans un sol pour la culture.

Systeme racinaire

La quantité de nutriments disponibles est estimée sur toute la profondeur de sol où les racines sont en activité. L'aspect, la croissance et la profondeur à laquelle les racines pénètrent dans les sols sont des propriétés spécifiques de chaque culture mais les conditions qui règnent dans le sol exercent habituellement une influence prononcée. S'il y a un horizon argileux, une couche compacte, ou toute autre formation dense, la profondeur normale des racines n'est pas atteinte. Les profondeurs d'enracinement de certains légumes et arbres fruitiers dans de bonnes conditions de sol et de gestion, sont indiquées aux tableaux 11 et 12. Toutefois, certaines espèces forestières et fourragères peuvent avoir un enracinement beaucoup plus profond.

La connaissance de l'enracinement habituel des cultures est utile aux agriculteurs pour déterminer de façon satisfaisante la profondeur de sol exploitée et indiquer la profondeur à laquelle les nutriments peuvent être disponibles pour la nutrition globale de la culture. En outre,

la même information aide pour se faire une idée de l'emplacement le plus efficace de l'engrais et de l'eau d'irrigation.

Tableau 11. Profondeurs d'enracinement de certains légumes (adapté de FAO, 1990)

| {PRIVATE }Superficiel (20-30 cm) | Profondeur modérée (30-50 cm) | Profond (>50 cm) |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Brocoli | Haricots | Artichaut |
| Choux de Bruxelles | Betterave | Asperge |
| Choux | Carotte | Potiron |
| Chou-fleur | Concombre | Patate douce |
| Céleri | Aubergine | Tomate |
| Choux chinois | Cantaloup | Pastèque |
| Ail | Pois | |
| Poireau | Poivron | |
| Laitue | Courge | |
| Oignons | Navet | |
| Pomme de terre | | |
| Radis | | |
| Epinard | | |

Tableau 12. Profondeurs d'enracinement de certaines plantes et arbres fruitiers (adapté de FAO, 1990)

| Plantes et arbres fruitiers | Profondeur des racines (cm) |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Fraises | 15-25 |
| Avocat | 120-150 |
| Citrus | 120-150 |
| Mangue | 130-180 |

Sol occupé par les racines

La masse du sol occupée par des racines en m³ est estimée par la formule suivante:

Poids de sol disponible dans la zone racinaire = surface (m²) x profondeur racinaire (m) X poids spécifique apparent du sol Bd (tonne/m³)

Exemple

Estimer le poids d'un hectare à une profondeur racinaire de 0,4 m et avec un sol de Bd 1.2 tonne/ha.

$$\text{Poids du sol} = 10\,000 \text{ m}^2 \times 0,4 \text{ m} \times 1,2 \text{ tonne/m}^3 = 4\,800 \text{ tonnes/ha}$$

Capacité d'approvisionnement en nutriments par le sol

La quantité de nutriments en g/ha est estimée par la formule suivante:

$$\text{Quantité de nutriments} = \text{Poids du sol (t/ha)} \times \text{nutriment disponible (g/t)}$$

Exemple

Estimer la quantité de nutriments disponibles dans le sol précédent où l'analyse indique que le nutriment disponible est de 10 ppm.

$$\text{Note: } 1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg/kg} = 1 \text{ g/t}$$

$$\text{Quantité de nutriments} = (4\ 800 \text{ t/ha}) \times 10 \text{ g/t} = 48\ 000 \text{ g/ha} = 48 \text{ kg/ha}$$

Pour éviter les calculs, le tableau 13 peut être employé pour estimer la quantité d'un nutriment, qui pourrait être fourni par le sol.

Comment employer le tableau 13. Les deux paramètres nécessaires sont la valeur du nutriment disponible en g/t (ppm) et la profondeur racinaire de la culture.

Exemple

Données.

Analyse de sol: P= 50 mg/kg; K = 90 mg/kg; Profondeur racinaire = 40 cm.

Lecture du tableau: P = 240 kg/ha; K = 432 kg/ha.

Tableau 13. Eléments nutritifs disponibles dans le sol en kg/ha déterminés par analyses chimiques à diverses profondeurs de sol. On suppose que le poids spécifique apparent du sol (Bd) est 1,2.

| {PRIVATE }Profondeur racinaire (cm) | Analyses chimiques du sol (mg/kg) | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 150 |
| 10 | 12 | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 | 84 | 96 | 108 | 120 | 180 |
| 20 | 24 | 48 | 72 | 96 | 120 | 144 | 168 | 192 | 216 | 240 | 360 |
| 30 | 36 | 72 | 108 | 144 | 180 | 216 | 252 | 288 | 324 | 360 | 540 |
| 40 | 48 | 96 | 144 | 192 | 240 | 288 | 336 | 384 | 432 | 480 | 720 |
| 50 | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 | 600 | 900 |
| 60 | 72 | 144 | 216 | 288 | 360 | 432 | 504 | 576 | 648 | 720 | 1080 |
| 70 | 84 | 168 | 252 | 336 | 420 | 504 | 588 | 672 | 756 | 840 | 1260 |
| 80 | 96 | 192 | 288 | 384 | 480 | 576 | 672 | 768 | 864 | 960 | 1440 |
| 90 | 108 | 216 | 324 | 432 | 540 | 648 | 756 | 864 | 972 | 1080 | 1620 |
| 100 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | 720 | 840 | 960 | 1080 | 1200 | 1800 |

Fraction de sol occupée par les racines

Les valeurs montrées au tableau 13 se rapportent au volume entier de sol jusqu' à une certaine profondeur. Cependant, le volume de sol occupé par des racines est habituellement plus faible et dépend de la plante, de l'espacement de la plantation et du système d'irrigation. Pour des légumes comme la tomate, le poivron, l'aubergine, irrigués au goutte à goutte, le volume mouillé du sol est habituellement de 30-40% du volume total. Avec un espacement plus large, ce qui est la cas pour le melon, la pastèque, le potiron, le volume de sol occupé par des racines pourrait même être inférieur à 20%. Pour des minisprinklers (exemple de la pomme de terre) le volume de sol occupé jusqu' à une certaine profondeur pourrait être de 70-80%. La fraction de sol occupée par des racines doit être prise en considération chaque fois que la quantité de nutriments disponibles est calculée; sinon, les quantités disponibles pourraient être surestimés et moins d'engrais appliqué. Les plantes pourraient alors montrer des symptômes de carence.

c) Capacité d'apport nutritif par les eaux usées. Cette capacité dépend de la quantité d'eau usée appliquée par ha par an et de la teneur de l'élément nutritif dans l'eau usée comme indiqué au tableau 8. Cette quantité ainsi que celle fournie par le sol sont soustraites de la quantité totale d'éléments nutritifs requis pour la culture. La quantité d'éléments nutritifs nécessaires à la culture et la quantité qui devrait être appliquée, ne sont pas équivalentes. Tous les éléments nutritifs fournis par des engrais ou par l'eau usée ne sont pas utilisés par la culture. La quantité réelle fournie par des engrais est habituellement plus élevée que la quantité requise pour la culture. L'absorption des nutriments dépendra, entre autres, du système d'irrigation.

d) Système (méthode) d'irrigation et efficacité d'absorption de N, P et K. L'efficacité d'absorption potentielle d'éléments nutritifs par une plante diffère avec le systèmes d'irrigation. En général, plus l'efficacité d'un système d'irrigation est élevée, plus élevée est également l'efficacité de prélèvement des nutriments. Pour un système d'irrigation bien conçu et avec un bon programme d'irrigation, le potentiel d'absorption en N, P et K par une culture est donné au tableau 14.

Tableau 14. Absorption en NPK (en %) en fonction du mode d'irrigation (FAO/RNEA, 1992).

| {PRIVATE }Mode d'irrigation * | Azote | Phosphore | Potassium |
|-------------------------------|-------|-----------|-----------|
| Raie | 40-60 | 10-20 | 60-75 |
| Sprinkler | 60-70 | 15-25 | 70-80 |
| Irrigation localisée | 75-85 | 25-35 | 80-90 |

*les valeurs se rapportent à des systèmes d'irrigation conçus et exploités correctement.

Avec les méthodes d'irrigation de surface, l'efficacité d'utilisation de l'engrais est la plus faible. En particulier, à cause du lessivage, l'efficacité d'utilisation de N peut être particulièrement faible. Par conséquent, afin d'estimer la quantité totale d'éléments nutritifs qui doivent être présents dans le sol pour répondre aux exigences des cultures, pour un certain rendement, il est nécessaire de connaître l'efficacité de prélèvement par la culture.

Besoins en azote, phosphore et potassium de différentes cultures

Tenant compte des besoins nutritionnels pour obtenir un rendement donné, de la capacité

nutritive du sol et de l'eau usée, et de l'efficacité du prélèvement des éléments nutritifs par les cultures sous différents systèmes d'irrigation, la formule suivante peut être employée pour estimer la quantité de N, P et K qui doit être aisément disponible dans le sol:

$$\text{Besoins nutritifs (kg/ha)} = \text{NR} - (\text{SAN} + \text{WN}) \times 100 / \text{IS}$$

Où: NR = Besoins en éléments nutritifs pour un rendement donné (kg/ha)
 SAN = Éléments nutritifs disponibles dans le sol (capacité d'approvisionnement du sol) (kg/ha)
 WN = Éléments nutritifs disponibles dans l'eau usée (kg/ha)
 IS = Efficacité d'absorption des éléments nutritifs selon le système d'irrigation (%).

Exemple

La culture est une tomate irriguée au goutte à goutte avec une profondeur d'enracinement de 40 cm. Les goutteurs humectent 35% de la superficie du sol. Les analyses de sol indiquent 20 ppm de P et 50 ppm de K et les analyses d'eau usée donnent 25, 8 et 35 ppm de N, P et K, respectivement. Trouver les besoins en N, P, K pour un rendement de 100 et 125 t/ha. L'efficacité de prélèvement des éléments nutritifs du système d'irrigation goutte à goutte est 80, 30, 85, pour N, P, K respectivement (tableau 14).

1. *Calculer le poids de sol d'un hectare à une profondeur de 40 centimètres*

$$\begin{aligned} \text{Le poids de sol (t/ha/0.4 m profondeur)} &= 10\,000 \text{ (m}^2\text{)} \times 0,4 \text{ (m)} \times \text{Bd (t/m}^3\text{)} \\ &= 4\,000 \text{ m}^3 \times 1,20 \text{ t/m}^3 \\ &= 4\,800 \text{ tonnes} \end{aligned}$$

2. *calculer P et K disponibles dans le sol*

$$\begin{aligned} \text{P (kg/ha)} &= (20 \text{ g/t}) \times 4\,800 \text{ t/ha} = 96\,000 \text{ g/ha} = 96 \text{ kg/ha} \\ \text{K (kg/ha)} &= (50 \text{ g/t}) \times 4\,800 \text{ t/ha} = 240\,000 \text{ g/ha} = 240 \text{ kg/ha} \end{aligned}$$

3. *P et K réellement disponibles dans les 35% de superficie du sol occupés par des racines*

$$\begin{aligned} \text{P} &= 96 \times 35/100 = 33,6 \text{ kilogrammes P/ha} \\ \text{K} &= 240 \times 35/100 = 84,0 \text{ kilogrammes K/ha} \end{aligned}$$

4. *Quantité de N, P, et K fournit par l'eau usée*

Afin d'estimer la capacité d'apport total en éléments fertilisants par les eaux usées, il est nécessaire de connaître les besoins en eau de la culture. Si les données des besoins en eau des cultures ne sont pas connues dans la région de la réutilisation, on peut alors utiliser les coefficients des bacs d'évaporation (Epan) recommandés pour certains légumes et pour les arbres fruitiers, et indiqués aux tableaux 15 et 16, respectivement. Il est à noter que ces valeurs sont basées sur des expériences à long terme et vérifiées pratiquement au niveau de la ferme. La quantité d'eau d'irrigation nécessaire pour une culture de tomates est indiquée au tableau 17.

On peut voir du tableau 18:

- en irrigation goutte à goutte, il n'est pas nécessaire d'ajouter du P et il faut ajouter peu de K pour une production de 100 t/ha,
- en irrigation à la raie, plus d'engrais est nécessaire pour le même rendement,
- avec l'eau claire, la quantité de fertilisants fournie par les eaux usées devrait être suppléée

- par les engrais,
- avec l'eau usée, si la fertilisation recommandée pour l'eau claire est appliquée, cela conduira à une surfertilisation et à une pollution.

Tableau 15. Besoins en eau de certains légumes exprimés en fraction de l'évaporation d'un bac Classe A (Papadopoulos)

| {PRIVATE }Culture* | Nombre de jours après la plantation | | | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|----------------------|--------------|
| | 0-15 | 15-30 | 30-45 | 45-60 | Ultérieur -rement | Dernier mois |
| Pommes de terre | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | |
| Carottes | 0.3 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.8 |
| Tomates | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 0.8 |
| Concombres | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.0 | 0.8 |
| Laitue | 0.3 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | | |
| Choux | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | |
| Haricots Verts | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | |
| Oignons | 0.3 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | | |
| Céleris | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | | |
| Aubergines | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 0.8 |
| Paprika | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.7 |
| Pastèque | 0.3 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | |
| Melon | 0.3 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | |

*Sous des conditions moins favorables pour la croissance, les quantités d'eau peuvent changer toutes les trois semaines.

Tableau 16. Besoins en eau de certains arbres fruitiers exprimés en fraction de l'évaporation d'un bac Classe A

| | | |
|------------------|---|---|
| Citrus | : | pour des arbres entièrement développés 0,55 |
| Avocats | : | pour des arbres entièrement développés 0,55 |
| Olives | : | en plein développement 0,33 |
| Mangues | : | en plein développement 0,33 |
| Raisins de table | : | la valeur croît graduellement de 0,2 à 0,5-0,6. |
| Bananes | : | accroissement graduel de 0,6 à 1,0 |

2.5 La surveillance et l'évaluation microbiologique

La surveillance et l'évaluation microbiologique n'est pas de la responsabilité des agriculteurs. Par conséquent, les autorités compétentes de chaque pays devraient indiquer aux agriculteurs les mesures conservatoires et additionnelles qu'ils doivent prendre, à tout moment, au cas où l'eau usée fournie n'aurait pas la qualité voulue. Aucune mesure unifiée pour tous les pays ne peut être recommandée. Pour les agriculteurs, il est important de surveiller les effets des produits chimiques et en particulier des éléments nutritifs sur le sol et les cultures afin d'ajuster la gestion en conséquence.

Tableau 17. Programme des irrigations d'une culture de tomate

| {PRIVATE }Zone "x" | | | | | | | | | | |
|---|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|---------|-------|
| Mois | Mars | | Avril | | Mai | | Juin | | Juillet | |
| | 1-15 | 15-31 | 1-15 | 15-30 | 1-15 | 15-31 | 1-15 | 15-30 | 1-15 | 15-31 |
| Pluviométrie Effective (mm) | 30 | 20 | 15 | - | - | - | - | - | - | - |
| Epan (mm) | 63 | 64 | 69 | 68 | 90 | 90 | 93 | 94 | 108 | 128 |
| Epan – Pluie Effective (mm) | 33 | 44 | 54 | 68 | 90 | 90 | 93 | 94 | 108 | 128 |
| Fraction de Epan | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.8 |
| Eau d'Irrigation (mm) | 10 | 22 | 43 | 61 | 81 | 90 | 90 | 93 | 94 | 102 |
| m ³ /ha | 100 | 220 | 430 | 610 | 810 | 900 | 900 | 930 | 940 | 1 020 |
| LA quantité totale d'eau nécessaire pour l'irrigation est d'environ 7 000 m³/ha | | | | | | | | | | |

Quantité de N, P et K en provenance des eaux usées (7 000 m³/ha):

$$N = 25 \text{ g/m}^3 \times 7\,000 \text{ m}^3/\text{ha} = 175 \text{ kg/ha}$$

$$P = 8 \text{ g/m}^3 \times 7\,000 \text{ m}^3/\text{ha} = 56 \text{ kg/ha}$$

$$K = 35 \text{ g/m}^3 \times 7\,000 \text{ m}^3/\text{ha} = 245 \text{ kg/ha}$$

Tableau 18. Quantités de N, P, K requises sous forme d'engrais sur la culture de tomates

| | kg/ha pour 100 t/ha | | | kg/ha pour 125 t/ha | | |
|-----------------------------------|---------------------|-----------|-----------|---------------------|------------|------------|
| | N | P | K | N | P | K |
| Irrigation goutte à goutte | | | | | | |
| Requis | 340 | 94 | 367 | 396 | 108 | 459 |
| A partir du sol | - | 34 | 84 | - | 34 | 84 |
| A partir de l'eau usée | 175 | 56 | 245 | 175 | 56 | 245 |
| Besoins en fertilisants | 165 | 4 | 38 | 221 | 18 | 130 |
| Irrigation à la raie | | | | | | |
| Requis | 497 | 189 | 416 | 579 | 216 | 520 |
| A partir du sol | - | 34 | 84 | - | 34 | 84 |
| A partir de l'eau usée | 175 | 56 | 245 | 175 | 56 | 245 |
| Besoins en fertilisants | 322 | 99 | 87 | 404 | 126 | 191 |

3 IRRIGATION AVEC L'EAU USÉE TRAITÉE

L'irrigation joue un rôle essentiel dans l'accroissement et la stabilité des rendements des cultures. Dans les régions arides et semi-arides, l'irrigation est essentielle pour une agriculture économiquement viable, alors que dans des régions semi-humides l'irrigation est souvent apportée sur certaines cultures en complément de la pluviométrie.

3.1 Méthodes d'irrigation

3.1.1 Méthodes (traditionnelles) de surface

- irrigation par submersion (à la planche ou par bassin), humecte presque toute la surface du terrain
- Irrigation par tuyaux.
- Irrigation à la raie (ou par sillon), une partie de la surface du terrain est humectée.

Ces méthodes sont utilisées sur presque 95% des superficies irriguées à travers le monde. Elles sont peu coûteuses, simples à comprendre et à mettre en œuvre. Elles conviennent à beaucoup de pays en voie de développement, en particulier si l'eau n'est pas le facteur limitant pour la production agricole.

3.1.2 Méthodes d'irrigation sous pression

Asperseurs (asperseurs de capacité élevée, mini asperseurs ordinaires et asperseurs). Les cultures et le sol sont mouillés de la même manière qu'avec la pluie.

Goutte à goutte (système d'irrigation ponctuel ou localisé). Les caractéristiques principales du système sont:

- efficacité élevée d'application. Si elle est employée correctement, c'est probablement la meilleure méthode d'irrigation dans les endroits où la pénurie de l'eau est un problème.
- méthode appropriée pour faire face aux problèmes associés à la salinité de l'eau d'irrigation et à l'alcalinité du sol.
- cette méthode est sûre et pourrait être la plus prometteuse pour l'irrigation avec l'eau usée, en particulier si le traitement est suffisant pour empêcher l'obstruction des orifices.
- le contact de l'eau usée avec les agriculteurs et les cultures irriguées est réduit au minimum.
- aucun aérosol ne se forme et, en conséquence, aucune pollution de l'atmosphère et de la zone proche des champs irrigués ne se produit.

Irrigation souterraine. Ce système n'est pas encore employé avec l'eau usée, mais il pourrait être utile pour irriguer avec de l'eau usée de mauvaise qualité et à risque sanitaire élevé. L'irrigation souterraine et l'irrigation localisée peuvent assurer une meilleure protection sanitaire.

Irrigation par Bubbler. C'est une technique d'irrigation localisée avec régulation de l'écoulement. Lorsqu'il y a danger de colmatage, ce système convient mieux que l'irrigation goutte à goutte et les mini asperseurs.

3.1.3 Choix du système d'irrigation

Le choix du système d'irrigation approprié dépend de la qualité de l'eau usée, de la culture, des coutumes, de l'expérience, de la compétence, de la capacité des agriculteurs à gérer les différentes méthodes et du risque potentiel sur l'environnement et sur la santé des agriculteurs et du public. Le tableau 19 qui évalue la convenance des méthodes d'irrigation, à savoir, la planche, la raie (ou sillon), l'aspersion, le goutte à goutte, par rapport à l'eau saumâtre est également valable pour l'eau usée traitée, en particulier en ce qui concerne la salinité.

Les problèmes de colmatage des asperseurs, des mini asperseurs, des goutteurs et des systèmes d'irrigation souterrains peuvent être sérieux. Son développement (dépôts biologiques, bactéries, etc.) dans les asperseurs, les orifices d'émission ou les canalisations d'alimentation, produit le colmatage. Les sels et les solides en suspension peuvent également produire le colmatage. Le colmatage le plus sérieux se produit avec l'irrigation goutte à goutte, qui est considérée comme le système idéal en ce qui concerne la protection sanitaire et la contamination des plantes, mais pourrait être difficilement utilisable si l'eau usée contient de fortes concentrations de matières en suspension (MES).

➤ **Recommandations**

Les agriculteurs doivent savoir que pour une eau usée traitée répondant à la directive de l'OMS (tableau 9), toutes les méthodes d'irrigation sont appropriées du point de vue du contrôle de la transmission de maladies, à condition que les critères agricoles soient également rencontrés. Si l'eau usée ne répond pas aux critères de santé alors:

- l'irrigation par aspersion (mini asperseurs, asperseurs, 'cracheurs', etc.) est seulement limitée aux fourrages, fibre, et production de graines.
- l'irrigation par pulvérisation d'eau sur les pelouses ou les domaines à accès illimité, peut être pratiquée pendant la nuit.
- l'irrigation par aspersion n'est pas recommandée en conditions venteuses. Les microbes pathogènes peuvent être emportés par le bouillard ou l'aérosol formé par la dérive du vent ce qui peut engendrer un risque sanitaire pour les ouvriers, les habitants de la ferme et des zones résidentielles voisines.
- si l'eau usée traitée n'a pas la qualité sanitaire et/ou environnementale acceptable, il faut mélanger l'eau usée traitée avec l'eau d'irrigation conventionnelle, si elle est disponible, pour permettre d'atteindre les prescriptions pour un certain usage.

Les méthodes d'irrigation doivent également être examinées par rapport à l'ampleur de leur pratique dans une zone ou un pays, l'expérience des agriculteurs avec certaines méthodes et l'ampleur de la contamination qu'elles peuvent induire sur les cultures, en particulier sur les parties comestibles.

3.2 Quantités d'eau et programmation des irrigations

A toutes fins pratiques, le besoin en eau des cultures est égal à leur évapotranspiration. Cette quantité pourrait être dépassée à cause des besoins en eau de lessivage. Une étude approfondie de ce sujet et des directives est donnée dans le bulletin numéro 24 de la série 'Irrigation et Drainage' de la FAO (1984). Le logiciel, appelé CROPWAT est disponible à la FAO. Il permet de déterminer des besoins en eau des cultures à partir de données climatiques. On peut également employer la méthode simple, basée sur l'évaporation d'un bac d'évaporation.

Tableau 19. Évaluation des méthodes d'irrigation pour leur aptitude à utiliser l'eau saumâtre (Kandiah, 1990)

| Paramètres d'évaluation | Irrigation à la raie | Irrigation à la planche | Irrigation par aspersion | Irrigation localisée |
|---|---|--|--|---|
| Le mouillage foliaire et endommagement des feuilles ayant pour résultat un rendement faible | Aucun dommage foliaire si la culture est plantée sur la crête du billon | Quelques feuilles inférieures peuvent être affectées, mais les dommages ne sont pas suffisamment sérieux pour réduire le rendement | Les feuilles peuvent être sévèrement endommagées ayant pour résultat une perte significative de rendement | Aucun dommage foliaire ne se produit avec cette méthode d'irrigation |
| Accumulation de sels dans la zone des racines avec les applications répétées | Les sels tendent à s'accumuler sur la crête du sillon, ce qui peut nuire à la culture | Les sels se déplacent vers le bas et ne sont pas susceptibles de s'accumuler dans la zone des racines | Les sels se déplacent verticalement et la zone racinaire n'est pas susceptible d'accumuler des sels | Les mouvements de sel sont radiaux le long de la direction du mouvement de l'eau. Une zone salée est formée entre les points de goutte à goutte |
| Capacité de maintenir un potentiel élevé de l'eau dans le sol | Les plantes peuvent être sujettes à un stress hydrique entre les irrigations | Les plantes peuvent être sujettes à un stress hydrique entre les irrigations | Il n'est pas possible de maintenir un potentiel en eau du sol élevé tout au long de la saison de croissance | Possibilité de maintenir un potentiel élevé en eau du sol tout au long de la saison de croissance et de réduire au minimum l'effet de la salinité |
| Convenance pour manipuler l'eau saumâtre sans perte significative de rendement | Faible à moyenne. Avec une bonne gestion et un bon drainage, il est possible d'obtenir des rendements acceptables | Faible à moyenne. Les bonnes pratiques en matière d'irrigation et de drainage peuvent produire un niveau de rendement acceptable | Très faible à faible. La plupart des récoltes souffrent de dommages sur des feuilles et d'un faible rendement. | Excellent à bon. Presque toutes les cultures peuvent se développer avec une réduction de rendement faible. |

Tableau 20. Facteurs affectant le choix de la méthode d'irrigation et les mesures spéciales nécessaires quand l'eau usée est utilisée, en particulier quand elle ne satisfait pas les directives de l'OMS (Mara et Cairncross, 1989)

| Méthode d'irrigation | Facteurs affectant le choix | Mesures spéciales pour les eaux usées |
|-------------------------------------|--|--|
| Irrigation à la planche | Plus faible coût, planage précis non nécessaire | Protection complète pour les ouvriers agricoles, les ouvriers qui manipulent les produits agricoles et les consommateurs |
| Irrigation à la raie | Faible coût, planage précis peut être nécessaire | Protection pour les ouvriers agricoles, éventuellement pour les ouvriers qui manipulent les produits agricoles et les consommateurs |
| Irrigation par aspersion | Efficacité moyenne d'utilisation de l'eau, nivellement non requis | Quelques cultures de la catégorie B*, principalement les arbres fruitiers, ne devraient pas être irrigués. Distance minimum de 50 – 100 m des maisons et des routes. Des eaux ayant été traitées par voie anaérobie ne devraient pas être employées, en raison des nuisances olfactives. |
| Irrigation souterraine et localisée | Coût élevé, efficacité d'utilisation de l'eau élevée, rendements plus élevés | Filtration pour prévenir le colmatage des distributeurs |

* Les catégories de cultures sont présentées aux chapitres suivants

A toutes fins pratiques, le besoin en eau des cultures est égal à leur évapotranspiration. Cette quantité pourrait être dépassée à cause des besoins en eau de lessivage. Une étude approfondie de ce sujet et des directives est donnée dans le bulletin numéro 24 de la série 'Irrigation et Drainage' de la FAO (1984). Le logiciel, appelé CROPWAT est disponible à la FAO. Il permet de déterminer des besoins en eau des cultures à partir de données climatiques. On peut également employer la méthode simple, basée sur l'évaporation d'un bac d'évaporation.

Le tableau 21 présente les besoins en eau de quelques cultures. La quantité réelle doit être ajustée aux précipitations efficaces, aux besoins de lessivage, aux pertes d'eau et à d'autres facteurs. Le besoin en eau recommandé pour une certaine culture et pour un endroit donné est estimé comme indiqué dans la section précédente ou basé sur des données météorologiques.

Tableau 21. Besoins en eau de quelques cultures (adapté de FAO, 1992)

| Culture | Besoins en eau (mm/période de croissance) |
|----------------|---|
| Luzerne | 800 – 1600 |
| Banane | 1200 – 2200 |
| Haricot | 300 – 500 |
| Choux | 380 – 500 |
| Citrus | 900 – 1200 |
| Coton | 700 – 1300 |
| Arachide | 500 – 800 |
| Maïs | 500 – 800 |
| Pomme de terre | 500 – 700 |
| Riz | 350 – 700 |
| Tournesol | 800 – 1200 |
| Sorgho | 450 – 650 |
| Blé | 450 – 650 |

3.3 Stratégie pour protéger la santé humaine et l'environnement

La santé humaine et l'environnement pourraient être protégés au travers de quatre groupes de mesures (Mara et Cairncross, 1987) :

- le niveau de traitement des eaux résiduaires,
- la restriction des cultures pratiquées,
- la méthodes d'irrigation,
- le contrôle de l'exposition humaine aux eaux usées épurées et l'hygiène.

Le traitement complet des eaux usées empêche les microbes pathogènes excrétés d'atteindre le champ. Cependant, les agriculteurs, dans la plupart des cas, doivent faire face à l'eau usée d'une certaine qualité. A cause de cela, la restriction des cultures, le choix du système d'irrigation et le contrôle de l'exposition humaine sont très importants. Une combinaison de mesures agro-techniques à sélectionner, selon les conditions socioculturelles, institutionnelles et économiques locales peut assurer la protection sanitaire.

3.3.1 *Choix des cultures pour la protection sanitaire*

L'eau usée qui répond aux directives de qualité de l'OMS pour un usage sans restriction (<1000 coliformes fécaux par 100 ml et < 1 oeuf de nématode par litre) peut être employée pour irriguer toutes les cultures, sans autres mesures sanitaires de protection supplémentaires. Si les directives de qualité de l'OMS ne sont pas entièrement satisfaites, il est encore possible d'irriguer certaines cultures sans risques pour le consommateur (figure 1). Les cultures peuvent être groupées en trois grandes catégories, en fonction du degré de protection sanitaire requis (Shuval et al., 1986).

Catégorie A Protection nécessaire seulement pour des ouvriers agricoles:

- cultures non destinées à la consommation humaine (coton, sisal),
- cultures normalement traitées par la chaleur ou le séchage avant consommation humaine (graines, graines oléagineuses, betterave à sucre),
- légumes et fruits cultivés exclusivement pour mettre en conserves ou autre procédé qui détruit efficacement les pathogènes,
- fourrages séchés au soleil et moissonnés avant consommation par les animaux,
- parc irrigué en zone clôturée sans accès au public (pépinières, forêts, et ceinture de verdure).

Catégorie B Des mesures complémentaires peuvent être nécessaires:

- terre de pâture, fourrage vert,
- plantes pour la consommation humaine qui n'entrent pas en contact direct avec l'eau usée, à condition que rien ne soit ramassé sur le sol et que l'irrigation par aspersion ne soit pas employée (cultures arbustives, vignes, etc.),
- plantes pour la consommation humaine, consommées seulement après cuisson (pommes de terre, aubergine, betteraves),
- plantes pour la consommation humaine, dont la peau n'est pas mangée (melons, pastèques, citron, bananes, noix, arachides),
- cultures irriguées par aspersion.

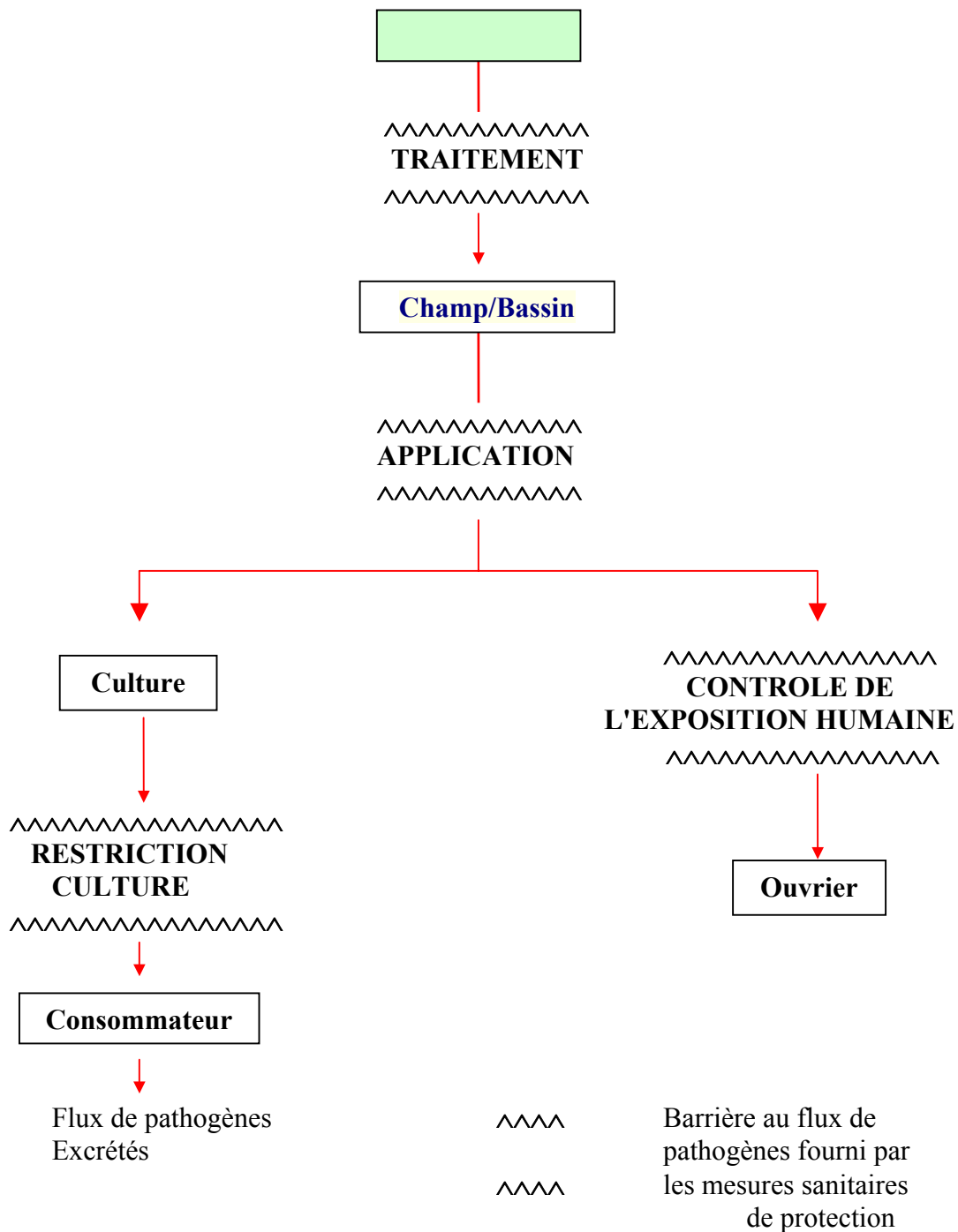


Figure 1. Organigramme pour montrer la transmission potentielle des microbes pathogènes et les points de rupture des flux de pathogènes produits par diverses mesures de protection (Blumenthal et al., 1989).

Catégorie C. Le traitement des eaux usées jusqu'à la qualité "sans restriction" des directives de l'OMS est essentiel.

- Les plantes souvent consommées crues et développées en contact étroit avec les eaux usées (légumes frais tels que la laitue ou les carottes, ou les fruits irrigués par aspersion).
- Irrigation des parcs avec accès public (parcs, pelouses, cours de golf).

L'adoption de la restriction des cultures comme moyen de protection de la santé et de l'environnement exige un cadre institutionnel et la capacité de surveiller et de contrôler la conformité aux règlements. Les agriculteurs doivent connaître la raison pour laquelle la restriction des cultures est nécessaire et doivent être aidés pour développer un système de culture. Les cultures irriguées avec l'eau usée traitée (indépendamment de la méthode d'irrigation et de la qualité de l'eau usée utilisée), ayant un potentiel de transmission de microbes pathogènes décroissant, sont classées de la façon suivante:

- 1) les légumes consommés crus,
- 2) les légumes consommés cuits,
- 3) les Plantes ornementales produites pour la vente sous serres,
- 4) les arbres produisant des fruits consommés sans épluchage,
- 5) les pelouses en zone d'agrément d'accès public illimité,
- 6) les arbres produisant des fruits consommés après épluchage,
- 7) les raisins de table,
- 8) les pelouses en zone d'agrément d'accès public limité,
- 9) les fourrages verts,
- 10) les arbres produisant des noix ou autres arbres semblables,
- 11) les cultures industrielles.

La restriction des cultures est une stratégie qui assure la protection du consommateur. Cependant cette stratégie n'assure pas la protection des ouvriers agricoles et leurs familles puisqu'ils qu'ils restent exposés au risque lié à la présence des microbes pathogènes dans le sol et sur les cultures. La restriction des cultures n'est donc pas une stratégie adéquate pour les agriculteurs au sens strict ; elle devrait être complétée par d'autres mesures comprenant leur hygiène personnelle et de leur famille.

3.4 Restrictions des cultures basées sur la composition chimique des eaux usées

En plus des critères de qualité des eaux usées relatifs à la santé, il peut être nécessaire que les agriculteurs choisissent des cultures selon leur tolérance à la composition chimique de l'eau usée traitée.

3.5 Contrôle de l'exposition humaine aux déchets et de l'hygiène

Contrôler le risque sur la santé publique des maladies véhiculées par les eaux lorsque l'eau usée traitée est utilisée en l'irrigation est très important. À cet égard, les groupes de personnes courant un tel risque et la façon dont de tels groupes sont exposés à ce risque, devraient être identifiés et examinés. Les groupes suivants peuvent être identifiés (Kypris, 1989) :

- **Les ouvriers agricoles.** La probabilité pour eux de se mouiller les mains, les vêtements, ou d'autres parties de leur corps à partir de fuites ou autrement, est certainement le plus gros risque d'exposition. Par conséquent, les agriculteurs devraient être avertis du risque et manipuler l'eau usée avec précaution.
- **Les ouvriers de manutention et emballage** des cultures polluées. Si des précautions appropriées n'étaient pas prises à l'étape du traitement et des pratiques d'irrigation adaptées n'étaient pas suivies par les agriculteurs, les microorganismes pathogènes pourraient être présents sur les cultures à de concentrations suffisantes pour polluer les mains ou les vêtements de ces ouvriers.
- **Les consommateurs.** C'est le public, comprenant les enfants, les personnes âgées et d'autres personnes à faible résistance aux microorganismes pathogènes qui forment le groupe le plus sensible. Les agriculteurs doivent se sentir concernés de manière à éviter la contamination des cultures. Les cultures contaminées par des microorganismes pathogènes, en particulier les cultures consommées crues, peuvent infecter les consommateurs, si elles ne sont pas correctement lavées et nettoyées. Les risques des consommateurs peuvent être réduits par la cuisson complète et par des niveaux d'hygiène élevés. Les riverains doivent être tenus informés de l'endroit où les champs irrigués avec les eaux usées sont situés. De cette façon, ils peuvent éviter d'y entrer et également empêcher leurs enfants de le faire aussi.
- **Le grand public** utilisant des zones d'agrément irrigués avec l'eau usée, en particulier si la pelouse sur laquelle des enfants jouent, ou d'autres personnes entrant en contact direct, est irriguée. Si les concentrations de microorganismes pathogènes demeurent élevées lors de l'application sur la pelouse, les risques de transmission des microorganismes pathogènes sont élevés. De cette application d'eau usée, les agriculteurs ne sont pas responsables.
- **Les personnes passant** près, ou vivant à proximité des zones irriguées avec l'eau usée traitée.

Il est évident que pour contrôler le risque sanitaire, les agriculteurs devraient être les premiers à connaître la qualité microbiologique de l'eau usée.

4 ASPECTS SANITAIRES DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES EN AGRICULTURE

4.1 Les acquis

La réutilisation de l'eau usée pour l'irrigation est associée à des agents biologiques (virus, bactéries, protozoaires pathogènes) qui entrent par voie buccale (par exemple, en mangeant des légumes contaminés par *ascaris*) ou par la peau (en cas de ankylostomes et de schistosomes), (WHO, 1988). Ces agents biologiques sont d'un intérêt particulier dans les pays où prévalent les diarrhées et les infections par les nématodes comme les pays du Proche Orient.

Il est très important de comprendre la transmission des vecteurs et les facteurs de risque sanitaire impliqués par les microbes pathogènes excrétés. Il y a 30 infections connues liées aux excréta, importantes pour la santé publique. Celles-ci peuvent être aisément groupées en cinq catégories, qui ont des caractéristiques environnementales de transmission et des propriétés pathogènes semblables. Les facteurs affectant la transmission des maladies dépendent de ce qui suit:

- le temps de survie du pathogène dans le sol, l'eau, sur les cultures ou les poissons,
- les infections dans l'hôte ou les hôtes intermédiaires,
- le mode et la fréquence des excréta ou de l'application d'eau usée,
- le type de culture auquel les excréta ou l'eau usée sont appliqués,
- la nature de l'exposition d'un hôte humain à la contamination du sol, de l'eau, des cultures ou des poissons.

La temps de survie des pathogènes excrétés dans différents environnements à une température de 20-30°C sont repris au tableau 22. Les données indiquent que presque tous les pathogènes excrétés peuvent survivre suffisamment longtemps dans l'eau, le sol, et sur les cultures pour engendrer des risques potentiels vis à vis des ouvriers agricoles (Mara et Cairncross, 1988).

Tableau 22. Temps de survie des pathogènes excrétés à 20-30°C

| Type of Pathogen | Temps de survie en jours | | | |
|------------------------------------|--|---|----------------|-----------------|
| | Dans les fèces, les matières de vidange et les boues | Dans les eaux claires et les eaux usées | Sur le sol | Sur les plantes |
| Virus <i>Enteroviruses</i> | < 100 (< 20) | < 120 (< 50) | < 100 (<20) | < 60 (<15) |
| Bactéries | | | | |
| Coliformes fécaux | < 90 (<50) | < 60(< 30) | < 70 (< 20) | < 30 (< 15) |
| <i>Salmonella</i> spp. | < 60 (< 30) | < 60 (< 30) | < 70 (< 20) | < 30 (<15) |
| <i>Shigella</i> spp. | < 30 (<10) | < 30 (< 10) | - | < 10 (< 5) |
| <i>Vibrio cholerae</i> | < 30 (< 5) | < 30 (< 10) | < 20 (< 10) | < 5 (< 2) |
| Protozoaires | | | | |
| <i>Entamoeba histolytica</i> cysts | < 30 (< 15) | < 30 (< 15) | < 20 (< 10) | < 10 (< 2) |
| | < 30 (< 15) | < 30 (< 15) | < 20 (< 10) | < 10 (< 2) |
| Helminthes | | | | |
| <i>Ascaris lumbricoides</i> oeufs | Plusieurs mois | Plusieurs mois | Plusieurs mois | < 60 (< 30) |

Les valeurs entre parenthèses montrent le temps de survie habituel

4.2 Considérations sur la qualité microbiologique de l'eau usée pour la réutilisation en agriculture

Les directives de qualité microbiologique pour la réutilisation de l'eau usée en agriculture, recommandées par l'OMS ont été données plus tôt au tableau 9. Il convient de noter que des risques élevés réels sont associés aux bactéries et aux nématodes intestinaux; tandis que les virus font courir peu ou pas de risque réel. Les études ont pratiquement ignoré le faible niveau d'occurrence endémique des maladies virales portées par les eaux pour plusieurs raisons (EPA, 1992).

- Une importante quantité d'informations existe, indiquant que les virus sont réduits ou inactivés à un faible niveau ou non mesurables par l'intermédiaire d'un traitement approprié des eaux résiduaires, y compris la filtration et la désinfection.
- Les méthodes courantes de détection de virus ne sont pas suffisamment sensibles pour détecter avec précision de faibles concentrations, même dans de grands volumes d'eau.
- Les infections entériques de virus ne sont pas souvent apparentes, de ce fait, il est difficile d'établir le caractère endémique de telles infections.
- Il n'y a aucun consensus parmi les experts, concernant l'impact sur la santé de faibles niveaux de virus dans l'eau usée épurée.
- La nature apparemment douce de la plupart des infections entériques de virus écarte la possibilité d'un rapport fiable du patient au médecin.
- Les techniques épidémiologiques courantes ne sont pas suffisamment sensibles pour détecter la transmission, par l'eau, de maladies virales causées par de faibles concentrations en virus. Le procédé pour déterminer en laboratoire la présence ou l'absence de virus dans un échantillon d'eau prend environ 14 jours et 14 jours supplémentaires sont exigés pour identifier les virus. Ceci s'ajoute à la complexité et au coût élevé des procédures, ainsi qu'au nombre limité de laboratoire ayant le personnel et l'équipement nécessaires pour réaliser ces analyses. Les dommages causés par les infections entéro-virales peuvent ne pas être évidentes pendant plusieurs mois ou années.
- Une fois présent dans la population, le contact de personne à personne devient un mode de transmission majeur d'un virus entérique, cachant de ce fait le rôle de l'eau dans la transmission.
- Aucun cas de maladie virale résultant de la réutilisation de l'eau usée n'a été prouvé dans les opérations de réutilisation de l'eau aux Etats-Unis.

4.2.1 Contamination de l'environnement par les parasites intestinaux

Le degré de contamination de l'environnement avec les parasites intestinaux est énorme et dépend, en grande partie, de la méthode d'évacuation des excréta. Environ 20 pour cent de la population de la région méditerranéenne orientale manque d'eau salubre, et plus de 30 pour cent manque de systèmes sanitaires adéquats. La contamination de l'environnement est inégale. Dans le cas de l'ascaridiose, elle est concentrée autour des maisons où les petits enfants sont les disséminateurs les plus importants de l'infection. Les oeufs d'ankylostomes sont disséminés par les adolescents et la contamination par les adultes est plus importante aux abords des champs cultivés. Le potentiel reproducteur de chaque ver femelle d'ascaris est extrêmement élevé - environ 240.000 œufs par jour - ce qui équilibre les lourdes pertes de ces œufs dans l'environnement.

Parmi les divers facteurs écologiques, (paysage, climat et type de sol) qui règlent la population d'oeufs d'ascaris en dehors de l'hôte humain, le facteur le plus important est le rayonnement solaire. Selon l'action ou l'absence d'action d'un ou plusieurs de ces facteurs, les œufs de *A. lumbricoides* peuvent survivre pendant plus de six années en climat tempéré, mais seulement pendant quelques heures sous des conditions tropicales.

4.2.2 Prévalence et intensité des infections helminthiques dans la région

Une étude d'Ali-shrayeh et al. (1989) récapitule six années de données accumulées sur 22.970 prélèvements à Naplouse, Cisjordanie (Jordanie):

| | |
|------------------|------------------------|
| <i>Ascaris</i> | 177 par 1000 personnes |
| <i>Trichuris</i> | 13 par 1000 personnes |

En Cisjordanie (Jordanie), les seules statistiques disponibles sur les cas d'ascaris trouvés dans les échantillons proviennent de patients qui visitaient l'hôpital pour des soins médicaux non parasitaires, et dont les échantillons de selles ont été examinés pour les oeufs d'helminthe. Un pour cent d'échantillons positifs ont été trouvés chez les patients dont les selles ont été examinées aux laboratoires centraux du ministère de la santé. Dans la ville d'Amman, la concentration des nématodes intestinaux, en 1988, était 297 oeufs par litre, dont 245 oeufs par litre étaient des *A. lumbricoides* (Al Salem et al., 1989). Alors que la concentration en oeufs d'ascaris dans les effluents issus des bassins de stabilisation d'Amman en 1998 était indétectable.

Une étude dans la bande de Gaza (Chris Smith, 1990) prouvait que plus que 50 % des enfants âgés de moins de 10 ans, ont été infectés par *Ascaris*.

Une étude à Riyad, Arabie Saoudite (Abdel-Hafez et al., 1986) sur 5.727 échantillons de selles de trois hôpitaux, en 1986, a montré:

| | |
|------------------|-----------------------|
| <i>Ascaris</i> | 30 par 1000 personnes |
| <i>Trichuris</i> | 25 par 1000 personnes |
| Ankylostomes | 4 par 1000 personnes |

En Egypte, un village approvisionné en eau courante, équipé de latrines et procédant à la collecte des ordures, a eu une prédominance d'ascaridiose inférieure (50%) et une concentration plus faible (4200 oeufs/g) qu'un village sans système sanitaire amélioré (prédominance de 76 % et concentration de 6900 oeufs/g), (Chandler, 1954).

Dans la région du sud de Batinah (Oman), une étude épidémiologique d'infestation parasitaire intestinale parmi des écoliers, a montré que 19% des écoliers examinés ont été contaminés par *H. nana*. Le pourcentage d'*ascaris lumbricoides* était relativement bas (0,1%), alors que pour les *strongyloides*, l'infestation était 5 par 1000 écoliers examinés (Al Salem, 1998).

4.2.3 L'intégration des diverses mesures pour la protection sanitaire (OMS 1998)

Aux planificateurs et aux décideurs concernés par la réutilisation des eaux usées, le traitement des eaux résiduaires apparaît comme la mesure la plus franche et la "plus

visible" pour la protection sanitaire, suivi seulement par la restriction des cultures. Il est cependant relativement difficile de mettre entièrement en application les deux mesures: la première est limitée par le coût et des problèmes opérationnels et d'entretien, et la seconde est restreinte par le manque de débouchés appropriés pour les produits spécifiques ou par des considérations juridiques et/ou institutionnelles.

Il convient de noter que l'application des mesures isolées peut avoir seulement des effets partiels en termes de protection sanitaire. La restriction des cultures, par exemple, si elle est appliquée, peut protéger les consommateurs des produits mais n'assure pas la protection aux ouvriers agricoles et à leurs familles.

Afin d'analyser les diverses mesures, sous un mode intégré, visant l'optimisation du schéma de protection sanitaire, un modèle généralisé est proposé. Il a été conçu pour aider à la prise de décision, en exposant la gamme des options pour protéger les ouvriers agricoles et les consommateurs des produits, et en tenant compte de la flexibilité de la réponse à différentes situations.

Chaque situation doit être considérée séparément et l'option la plus appropriée doit être choisie en tenant compte des facteurs économiques, culturels et techniques. Le graphique pour la conception du modèle est montré à la figure 2, ci-dessous.

On suppose que le flux de pathogènes part du centre du cercle et passe à travers cinq bandes concentriques qui représentent l'eau usée des excréta, le champ ou les lagunes, les cultures, les ouvriers agricoles et les consommateurs. Le cercle noir épais représente une barrière au delà de laquelle les pathogènes ne devraient pas passer, si la santé doit être protégée. Le niveau de la contamination de l'eau usée, du champ, ou de la culture ou le niveau du risque du consommateur ou de l'ouvrier est montré par l'intensité du grisé. Les secteurs blancs dans les trois bandes externes signifient zéro ou niveau de contamination non significatif, et dans les bandes internes, une absence présumée de risque sanitaire ; ceci indique donc que la stratégie mène à une utilisation "sûre" de l'eau usée.

Si aucune mesure de sauvegarde n'est prise, les ouvriers et les consommateurs seront exposés au plus grand risque de contamination. En supposant que la restriction des cultures est appliquée (régime A, fig. 2), les consommateurs seront préservés mais les ouvriers seront toujours exposés au risque. Le régime B suppose que l'eau usée est appliquée par irrigation souterraine, empêchant ainsi la contamination des cultures et, par conséquent, le maintien des ouvriers et des consommateurs pratiquement protégés de la contamination.

Les trois régimes suivants, E, F et G, sont donnés comme exemples de mesures de sauvegarde. Le régime E inclut une restriction partielle de traitement et de récolte. Dans ce cas-ci, la pleine protection est assurée aux consommateurs mais seul le traitement par lagunage assurera la pleine protection aux ouvriers. Dans le régime F, le contrôle de l'exposition humaine est ajouté au traitement partiel. La combinaison des deux mesures peut mener à la protection des ouvriers mais un niveau faible de risque demeure toujours pour les consommateurs.

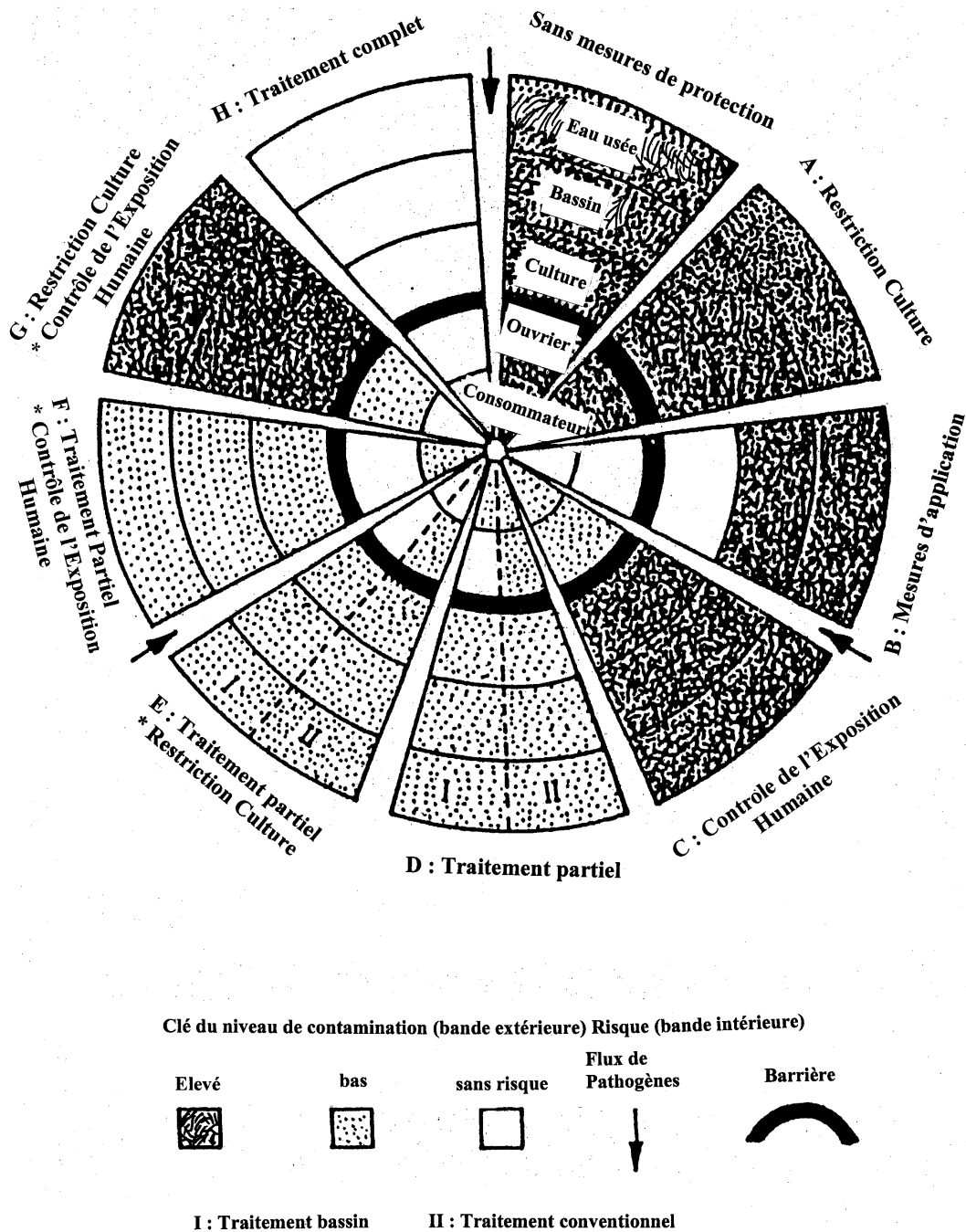


Fig. 2. Modèle généralisé montrant le niveau de risque sanitaire associé aux différentes combinaisons de mesures de contrôle pour l'usage de l'eau usée ou des excréta en agriculture ou en aquaculture (Blumenthal et al. 1989)

Associer la restriction des cultures et le contrôle de l'exposition humaine (régime G) assurera la pleine protection des consommateurs mais quelques risques subsisteront toujours vis à vis des ouvriers.

En conclusion, le régime H inclut le traitement complet de l'eau usée, qui assurera la protection complète des ouvriers et des consommateurs. La faisabilité et l'efficacité de toute combinaison de mesures dépendront de plusieurs facteurs locaux, qui doivent

être soigneusement considérés avant qu'un choix final ne soit fait. Certains de ces facteurs sont les suivants:

- disponibilité des ressources (établissement, personnel, fonds),
- pratiques sociales et agricoles existantes,
- circuits existants de maladies liées aux excréta.

4.2.4 Questions spéciales relatives à la santé

En 1989, l'OMS a édité de nouvelles directives pour l'utilisation de l'eau usée en agriculture et en aquaculture (tableau 9). Les directives ont inclus une nouvelle dimension, qui n'avait pas été considérée dans le rapport précédent de l'OMS sur la réutilisation (OMS, 1973). Les nouvelles directives ont placé des critères de qualité microbiologiques pour l'usage de l'eau usée en irrigation des

- cultures destinées à être mangées crues ou cuites,
- aires de sport; parcs publics,
- cultures de céréales; cultures industrielles,
- fourrages et arbres.

La nouvelle dimension dans les directives exige que l'eau usée doit contenir moins de un oeuf de nématode par litre. En plus des oeufs de nématode, le critère 'coliformes fécaux' a été mis à jour et exige que l'eau usée contienne moins de 1000 coliformes fécaux par 100 ml pour les légumes mangés crus.

Les directives de l'OMS (WHO, 1989) indiquent que:

- La présence de nématodes libres, de larves, parfois en grand nombre dans des effluents des bassins de stabilisation est sans signification sur la santé publique parce qu'ils ne sont pas pathogènes pour les êtres humains.
- Cette déclaration est valide pour tous les pathogènes helminthiques excrétés dans les fèces, exceptés *Strongyloides Stercoralis* (nématode) et *Enterobius Vermicularis* (oxyure), puisque leurs oeufs ne sont pas normalement excrétés dans les fèces. L'oxyure est d'importance mineure pour la santé publique parce que c'est une infection qui ne cause généralement pas une maladie sérieuse.
- *Strongyloides* est potentiellement dangereux, en particulier chez les individus immuno-déficients sous-alimentés. Quand la réponse immunitaire du corps est déficiente, la dissémination de la strongylose peut se produire, avec des larves attachées sur la plupart des organes du corps; de tels cas sont habituellement mortels (Feachem, 1983).
- Le mode de transmission de strongyloses contagieuses par des larves filiformes, qui se développent dans la plupart des sols, contaminés par des fèces est: pénétrer la peau (habituellement par le pied), pénétrer la circulation veineuse, et migrer vers les poumons. Elles pénètrent et libèrent des larves non contagieuses, qui émigrent dans le lumen de l'intestin, quittent l'hôte dans les fèces et développent l'une ou l'autre larves filairiformes contagieuses, qui peuvent infecter le même ou un nouvel hôte, ou sous forme d'adultes libres après passage par le sol (Benenson, 1985).

En outre, Feachem et al. (1983) ont déclaré que "*Strongyloides stercoralis* est un petit nématode parasitant l'homme. Les femelles adultes mesurent seulement 2-2,5 millimètres de long et vivent incorporés dans les muqueuses du petit intestin."

Les oeufs sont ovoïdes et mesurent 50-60 par 30-35 micromètres, mais sont rarement vus parce que les larves sortent en passant dans les fèces. *S. Stercoralis* existe dans les matières de vidange et les boues comme larve sensible, pas comme oeuf robuste. Une nouvelle infection peut être lancée par la pénétration d'une simple larve. Puisque les *Strongyloides* représentent un risque réel élevé, on recommande de les éliminer à 100%. Ceci signifierait avoir zéro larve/litre de *S. Stercoralis*, parce que l'infection peut être initiée par la pénétration d'une simple larve de *S. Stercoralis* par la peau. La période de transmissibilité est aussi longue que le temps de survie du vers dans l'intestin qui peut s'étendre jusqu'à 35 ans (Benenson, 1985). Pour ce qui concerne l'inactivation des *Strongyloides* par les processus de traitement des eaux résiduaires, aucune étude n'est rapportée (Feachem, 1983).

Cependant, la pasteurisation des boues, comme appliquée actuellement en Suisse et en Allemagne, à 70° C pendant 30 minutes, peut offrir une sécurité considérable. "Les pathogènes peuvent être réduits par une filtration rapide sur sable mais pas notablement, et probablement de façon insuffisante pour justifier l'investissement dans cette méthode de filtration par le bénéfice qu'elle produit. Dans les effluents chlorés, la plupart des oeufs d'helminthe sont totalement indemnes " (Feachem, 1983). Ceci a été confirmé par une étude effectuée en Jordanie et à la suite de l'installation de traitement tertiaire de Bahreïn fonctionnant sur la filtration, la chloration et l'ozonation (Al Salem, 1992).

Jusqu'ici, il n'y a aucune méthode fiable garantissant l'inactivation par le processus de traitement de l'eau usée ou des boues. On recommande de prendre des mesures de protection en portant des chaussures et des gants, en enterrant les boues à au moins 0,5 m de la surface et en arrêtant l'irrigation des cultures au moins trois semaines avant la récolte.

5 ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ASSOCIÉS À L'UTILISATION DES EAUX USÉES EN IRRIGATION

Avantages environnementaux

Lorsque l'eau usée est utilisée correctement à des fins agricoles, plutôt que tout autre utilisation, l'environnement peut être amélioré. Voici quelques avantages environnementaux :

- La suppression de rejet en eaux de surface, prévient l'éventualité de situations esthétiques désagréables, de conditions anaérobies dans les cours d'eau et l'eutrophisation des lacs et réservoirs. La conservation des ressources en eau fournit des avantages à l'utilisation telles que l'approvisionnement en eau et la préservation des étendues d'eau à usage récréatif.
- La sauvegarde des ressources en eaux souterraines dans les zones de surexploitation de ces ressources pour l'agriculture pose le problème de l'épuisement et de l'intrusion du biseau salin.
- La possibilité de conservation des sols et de leur amélioration par apport d'humus sur les terres agricoles et de prévention de l'érosion.

Effets négatifs potentiels sur l'environnement

L'utilisation d'eau usée pour l'irrigation peut avoir également des effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine. Les principaux dangers pour l'environnement associés à l'eau usée sont :

- l'introduction des produits chimiques dans des écosystèmes sensibles (principalement le sol, l'eau et les plantes),
- la propagation des microorganismes pathogènes.

5.1 Effets sur le sol

Ces impacts sont d'importance particulière pour les agriculteurs puisqu'ils peuvent réduire la productivité, la fertilité et le rendement de leurs terres. Le sol doit rester à un bon niveau de fertilité chimique et physique, afin de permettre une utilisation durable à long terme et une agriculture rentable. Les problèmes prévus au niveau du sol sont :

- la salinisation,
- l'alcalinité et la réduction de la perméabilité du sol,
- l'accumulation d'éléments potentiellement toxiques,
- l'accumulation de nutriments.

5.2 Effets sur les eaux souterraines

Dans certaines conditions, les effets sur les eaux souterraines sont plus importants que les effets sur le sol. La pollution des eaux souterraines avec des constituants de l'eau usée est possible.

➤ **Pour réduire et/ou surmonter le problème, les aspects suivants sont recommandés:**

- irrigation (quantité d'eau) basée sur les besoins en eau des cultures avec lessivage minimum si nécessaire,
- établissement du programme d'irrigation basé sur les besoins en eau des cultures, la capacité de stockage en eau du sol et la qualité de l'eau usée,
- sélection des cultures qui peuvent absorber les constituants potentiellement dangereux présents dans l'eau usée,
- en cas d'eaux salines, introduction dans la rotation culturale, de plantes consommant les sels,
- limitation de la quantité d'eau de façon à assurer l'apport exacte en N nécessaire à la culture, afin d'éviter la contamination par NO₃-N. Si N excède les besoins des cultures on doit alors:
 - sélectionner des cultures à besoins élevés en N,
 - choisir un système d'irrigation qui fournit l'uniformité d'application la plus élevée possible,
 - mélanger l'eau usée avec de l'eau claire,
 - maintenir la maintenance et l'entretien des systèmes d'irrigation à un niveau acceptable.

5.3 Effets sur les eaux de surface

5.3.1 Eutrophisation, croissance des algues

La concentration élevée en N et P dans l'eau usée est d'un intérêt particulier lorsque l'eau usée est mélangée dans un barrage, avant irrigation, car ces éléments peuvent créer des conditions favorables à l'eutrophisation. Dans de telles conditions, l'apparition d'algues vertes est très fréquente et il est difficile de remédier aux problèmes y associés, en particulier à l'obstruction des systèmes d'irrigation pressurisés. Ce problème est un des soucis majeurs des agriculteurs.

Le problème d'eutrophisation et du déficit en oxygène, dû aux nutriments dans l'eau usée, est particulièrement important quand l'effluent est déchargé dans les étendues d'eau (fleuves, lacs et mer). L'azote est le facteur limitant pour la croissance des algues en mer, alors que N et P sont les facteurs limitants dans les lacs, les bassins d'eau salée et dans les barrages où l'eau usée est stockée avant irrigation.

5.4 Effets sur les cultures : Problème de phytotoxicité et gestion

Au delà de l'effet global de certains constituants de l'eau usée sur les cultures irriguées comme la salinité, l'eau usée peut potentiellement créer une toxicité due à une concentration élevée de certains éléments comme le bore et quelques métaux lourds. Les nécroses sur les feuilles identifient des symptômes de toxicité au bore chez les cultures sensibles de bore. Les aspects de toxicité sont discutés plus en détail en relation avec l'utilisation des boues résiduelles en agriculture.

5.5 Problèmes de santé animale

L'eau usée épurée peut être utilisée pour abreuver les animaux si elle répond aux directives reprises au tableau 23 où les valeurs maximum autorisées pour certains éléments sont indiquées. C'est important, puisque dans la plupart des cas, il est

difficile de contrôler les animaux domestiques lorsqu'il s'abreuvent. Les agriculteurs avisés de ces directives peuvent ainsi protéger la santé de leurs animaux domestiques.

Tableau 23. Directives pour des niveaux de substances toxiques dans l'eau de boisson du bétail

| Constituent (Symbole) | Limite supérieure (mg/l) |
|---|--------------------------|
| Aluminium (Al) | 5.0 |
| Arsenic (As) | 0.2 |
| Béryllium (Be) ² | 0.1 |
| Bore (B) | 5.0 |
| Cadmium (Cd) | 0.05 |
| Chrome (Cr) | 1.0 |
| Cobalt (Co) | 1.0 |
| Cuivre (Cu) | 0.5 |
| Fluor (F) | 2.0 |
| Fer (Fe) | non nécessaire |
| Plomb (Pb) ³ | 0.1 |
| Manganèse (Mn) ⁴ | 0.05 |
| Mercure (Hg) | 0.01 |
| Nitrate + Nitrite (NO ₃ -N+NO ₂ -N) | 100.0 |
| Nitrite (NO ₂ -N) | 10.0 |
| Sélénium (Se) | 0.05 |
| Vanadium (V) | 0.10 |
| Zinc (Zn) | 24.0 |

¹ adapté de l'Académie Nationale des Sciences (1972).

² Données insuffisantes pour le bétail. La valeur relative à la vie aquatique marine est employée ici.

³ Le plomb se cumule et les problèmes peuvent commencer à une valeur- seuil de 0,05 mg/l

⁴ Données insuffisantes pour le bétail. Valeur utilisée pour l'eau potable humaine.

6 MESURES DE CONTROLE

6.1 Considérations générales

Aux planificateurs concernés par la réutilisation des eaux usées, le traitement des eaux résiduelles apparaît comme la mesure la plus sérieuse et la "plus évidente" pour la protection sanitaire, secondée seulement par la restriction des cultures. Cependant, il est relativement difficile de mettre les deux mesures entièrement en application: la première mesure est limitée par le coût et les problèmes de maintenance et d'entretien, et la seconde par le manque de marchés appropriés pour les produits agricoles, ou par des contraintes légales et/ou institutionnelles.

L'application de mesures isolées peut avoir seulement des effets partiels en termes de protection sanitaire. La restriction des cultures, par exemple, peut protéger les consommateurs mais n'assure pas la protection des ouvriers agricoles et de leur famille.

6.2 Directives de réutilisation des eaux usées

Les directives de réutilisation peuvent aider à protéger la santé publique et l'environnement. Actuellement, il y a deux situations dans les pays de la région du Proche Orient:

- les directives nationales sont disponibles et les agriculteurs doivent les suivre et les respecter,
- il n'existe pas de directives nationales. Dans ce cas, les directives de l'OMS sont proposées comme solution (tableau 9).

6.3 Contrôle de qualité de l'eau usée

Comme déjà mentionné, la surveillance générale et le contrôle de qualité de l'eau usée ne sont pas de la responsabilité des agriculteurs mais des autorités. La qualité dépend du niveau de traitement, de la maintenance et de l'entretien du système de traitement et de l'expérience des personnes faisant fonctionner la station d'épuration des eaux résiduelles.

Cependant, la formation des agriculteurs pour suivre, au moins visuellement ou avec des essais simples, la qualité de l'eau usée peut être très utile. Les fermiers devraient être en mesure de juger si l'eau usée a été convenablement traitée. Les changements de couleur de l'eau usée ou la croissance abondante des algues sont des indicateurs d'un niveau élevé en produits chimiques et en nutriments dans l'eau usée. L'odeur indique un traitement insuffisant. Les agriculteurs devraient être formés sur ces aspects avant l'attribution de l'eau usée pour l'irrigation. En outre, il est nécessaire d'accorder aux agriculteurs le libre accès à l'information relative à la qualité de l'eau et au type d'eau avec laquelle ils sont approvisionnés.

6.4 Contrôle des équipements de stockage, de transport et de distribution

Ces aspects ne sont pas de la responsabilité des agriculteurs mais ceux-ci doivent être informés dans la mesure où cela concerne le stockage et la distribution de l'eau usée

dans leur ferme. Ceci peut éviter l'utilisation accidentelle de l'eau usée ou les dommages accidentels du système.

Problèmes associés à la surveillance et à l'évaluation

La surveillance et l'évaluation sont des conditions essentielles de tout projet qui emploie l'eau usée traitée. Ce doit être une activité continue, qui constitue une partie intégrante de l'opération et de la gestion d'un tel projet. Sans système régulier et efficace de surveillance et d'évaluation, les avantages escomptés du projet de réutilisation ne continueraient pas à s'accroître sur le long terme et durablement, menant ainsi à la possibilité que le projet pourrait, par la suite, créer de sérieux dangers pour la santé et l'environnement.

Ainsi, un système de surveillance et d'évaluation efficace, soigneusement conçu, est un préalable essentiel au succès de tout projet de réutilisation d'eau usée.

Surveillance intégrée de la qualité des effluents traités réutilisés en irrigation (FAO, 1995)

En irrigation avec l'eau usée traitée, un problème critique est l'impact de ses constituants sur le sol et/ou les cultures ainsi que sur les animaux et les humains nourris avec ces cultures.

Les paramètres de qualité **chimiques** proposés, qui peuvent être surveillés régulièrement ou périodiquement par des agriculteurs ou pour les agriculteurs, par les autorités officielles sont:

- **ECw = conductivité électrique** exprimée en dS/m, mesurée à 20° C. Il est un des paramètres généralement le plus mesuré, en particulier dans des régions arides et semi-arides, pour estimer la valeur totale en sels solubles dans l'eau. La salinité est probablement le paramètre simple le plus important, qui détermine le système de culture et la gestion des terres irriguées avec l'eau usée.
- **Les cations et les anions**
Ca, Mg, Na, CO₃, HCO₃, SO₄, Cl. Certains de ces ions peuvent être surveillés seulement au début et ensuite périodiquement puisqu'ils changent peu. Quelques autres ions comme le bore doivent être surveillés régulièrement dans le cas où des détergents à base de bore sont largement utilisés. Le bore dans l'eau usée peut être le facteur limitant principal pour sa réutilisation en irrigation.
- Le rapport d'adsorption du sodium, l'index le plus largement répandu pour mesurer les changements physico-chimiques du sol:

$$\text{SAR} = \text{NA}/[(\text{Ca}+\text{Mg})/2]^{1/2}$$

où les concentrations ioniques sont exprimées en méq/l.

- **Métaux lourds et oligoéléments**

Bien que les métaux lourds et les oligoéléments (Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Li, Mn, Hg, Ni, Se) ne sont pas nécessairement un problème pour la réutilisation de l'eau usée, il est recommandé que ces éléments soient déterminés au moins une fois avant la première irrigation. La surveillance périodique est recommandée pour ceux trouvés en concentrations qui peuvent affecter le système sol-plante.

Nutriments de la plante

Il est recommandé de surveiller $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, P et K, pour trois raisons principales :

- l'estimation des engrais additionnels à fournir pour optimiser le rendement et la qualité des cultures ;
- le choix du système agricole approprié pour la meilleure efficacité d'utilisation des nutriments et de l'eau ;
- la protection des eaux de surface et souterraine de la pollution par $\text{NO}_3\text{-N}$.

7 ASPECTS SOCIOCULTURELS, LÉGAUX, INSTITUTIONNELS ET ÉCONOMIQUES

Ce chapitre est concis et couvre l'intérêt direct des agriculteurs. Il est destiné à informer l'agronome du service de vulgarisation. Les agronomes vulgarisateurs doivent être instruits des aspects légaux et institutionnels en vigueur dans leur pays afin de contrôler et donner les meilleurs conseils aux agriculteurs, en vue de surmonter les problèmes communs qui se posent lors de l'utilisation d'eau usée traitée.

7.1 Acceptabilité sociale et information du public

Dans certains pays, la réutilisation de l'eau usée traitée présente un nouveau concept. Une condition importante de l'utilisation sûre et rentable de l'eau usée urbaine est l'éducation de tous les participants. La formation du personnel, qui contrôle et maintient les équipements de traitement, et des agriculteurs, qui utilisent l'eau usée traitée, est nécessaire.

L'eau usée est sous utilisée en tant que ressource et même dans certains cas non considérée pour la réutilisation, à cause des raisons principales suivantes:

- manque d'informations sur ses avantages,
- crainte de risque sanitaire supposé,
- partialité culturelle, croyance religieuse, perception du public,
- manque de méthode d'analyse économique claire et distincte des projets de réutilisation,
- expérience médiocre avec la réutilisation d'eau usée lorsqu'elle a été pratiquée en conditions non contrôlées.

Par conséquent, un soin spécial doit être pris pour organiser un programme d'information et d'éducation qui fera participer toutes les personnes de la communauté et non seulement les agriculteurs. La deuxième étape doit être un programme de formation pour les utilisateurs (agriculteurs), parce qu'un usage abusif de l'eau usée peut mener à la répugnance.

Une campagne d'information du public, bien organisée, doit être planifiée comme moyen d'informer le public de la question. Son premier objectif sera de déclencher la conscience collective et de présenter la réutilisation de l'eau usée comme une technique de substitution fiable. Elle devrait également mettre au courant les utilisateurs potentiels des faits liés à la réutilisation d'eau usée. Les agriculteurs et le public en général devraient se rendre compte non seulement des avantages, qui résulteront de la réutilisation, mais également des risques sanitaires et environnementaux liés à l'utilisation d'eau usée. La campagne d'information devrait avoir pour objectif de réduire au minimum la partialité culturelle et psychologique liée à l'eau usée.

7.2 Formation et développement des ressources humaines

Le manque de qualification et de connaissances peuvent entraîner l'échec dans l'exécution du projet et, dans le cas des projets de réutilisation d'eau usée, peuvent potentiellement augmenter les risques sur la santé publique et l'environnement. Pour

cette raison, les programmes de formation doivent être une partie intégrante des projets. Les programmes de formation doivent inclure les aspects technique, environnemental, sanitaire et socio-économique. L'apport éducatif doit fournir aux agriculteurs une compréhension des détails techniques et des risques associés ainsi que les précautions à prendre de sorte que les opérations aient lieu avec un niveau acceptable de sûreté et à un coût raisonnable.

La synchronisation et la durée du programme de formation sont d'importance capitale puisque les personnes doivent être suffisamment formées pour travailler correctement lorsque c'est nécessaire. Ainsi, les agriculteurs doivent avoir déjà reçu la formation nécessaire avant d'entamer l'utilisation de l'eau usée. Les agriculteurs doivent être demandeurs de la formation. Les aspects de la formation peuvent être plus ou moins ceux couverts par ce manuel.

La formation est exigée non seulement avant l'utilisation d'eau usée mais de temps en temps ultérieurement, parce que l'entretien et/ou l'évolution des qualifications ainsi que la formation de nouveaux agriculteurs doivent s'inscrire dans un processus continu.

7.3 Aspects institutionnels, surveillance et mesures de contrôle

La récupération et la réutilisation d'eau usée est considérée de plus en plus comme un moyen d'augmenter les ressources en eau existantes et futures pour couvrir la demande croissante en eau. L'eau recyclée est une source fiable même en années de sécheresse, particulièrement en environnement urbain, où il est possible d'utiliser l'eau potable pour un usage non-potable de l'eau. Cependant, on doit veiller à éviter des risques sanitaires et environnementaux.

Etant donné les risques associés à la réutilisation d'eau usée traitée, un cadre institutionnel approprié devrait toujours être formé pour commander, diriger et donner un avis sur la gestion des projets de réutilisation, afin d'en assurer une réutilisation saine. Au niveau national, l'utilisation de l'eau usée traitée est une activité impliquant les responsabilités de plusieurs ministères ou agences. Le cadre institutionnel doit être bien défini et la distribution des responsabilités clairement indiquée. Considérant qu'habituellement un grand nombre d'institutions sont impliquées, des opérations sans heurt de différentes interactions ne sont pas toujours faciles à réaliser. La forme et les caractéristiques opérationnelles du cadre institutionnel changent en fonction du pays. Il devrait être conçu pour satisfaire aux conditions locales. Les fermiers doivent être informés des responsabilités de chaque institution afin d'adresser leurs questions et/ou problèmes de façon ciblée. Sans ces informations de base, une confusion générale risque de se développer.

7.4 Considérations réglementaires et questions de droit

La santé publique et l'environnement sont les soucis principaux dans les projets de réutilisation de l'eau usée. À cet égard, les directives de qualité aussi bien que les conditions pour le traitement, le prélèvement et la surveillance sont indispensables dans chaque pays. Dans un certain nombre de pays, des mesures de contrôle strictes à la réutilisation sont imposées. De cette façon, les agriculteurs sont obligés d'agir dans le cadre de ces règlements afin de sauvegarder la santé publique et l'environnement.

Cependant, le respect des règlements par les agriculteurs est incertain, ce qui rend essentielle une surveillance rigoureuse. D'ailleurs, des actes législatifs pour faire observer les règlements peuvent être nécessaires.

La plupart des pays où la réutilisation d'eau usée est pratiquée possèdent des législations sanitaires et environnementales qui régissent le traitement et la réutilisation des eaux usées. Ces règlements, sous forme de directives ou codes de bonnes pratiques, ont pour objet la protection de la santé des consommateurs et des ouvriers. Ils peuvent interdire l'irrigation avec l'eau usée au cours de périodes précises (avant la moisson), exiger un habillement approprié et prévoir la prévention sanitaire des ouvriers. Les directives pour la réutilisation de l'eau usée, bien que variables d'un pays à l'autre, sont habituellement très rigoureuses en raison des conditions de lutte contre la pollution de l'eau. La technologie impliquée dans le processus de traitement ainsi que les opérations appropriées doivent permettre d'atteindre les objectifs des directives. Les organismes de réglementation doivent toujours être prêts à surveiller la qualité de l'eau usée traitée et à imposer des règlements pertinents, afin de sauvegarder la santé des agriculteurs et des consommateurs.

Dans plusieurs pays du Proche Orient, la technologie pour produire un effluent de qualité n'est pas souvent disponible, ou si elle est disponible, elle n'est pas correctement entretenue. Les organismes de réglementation peuvent rarement imposer les directives. La réutilisation de l'eau usée est donc souvent non contrôlée et les ouvriers et les consommateurs sont habituellement en danger. Pour résoudre le problème légal de directives inapplicables, la première étape est de fixer des critères réalistes reflétant les risques encourus. Il est important que les critères de qualité soient fixés de façon à favoriser, plutôt que limiter, la réutilisation des effluents.

7.5 Aspects économiques

Pour les agriculteurs, l'incitation principale est le bénéfice attendu de l'utilisation de l'eau usée en irrigation. L'utilisateur n'est pas intéressé par le coût de collecte, de traitement, de distribution et d'autres aspects. Il trouve son intérêt si, avec une certaine quantité d'eau usée de qualité donnée, payée à un certain prix ou reçue gratuitement, et avec une certaine restriction des cultures, il peut pratiquer une agriculture irriguée profitable.

Avantages

Les avantages peuvent être brièvement récapitulés comme suit :

- économie d'eau claire,
- économie de fertilisants,
- accroissement de rendement,
- création d'emplois.

En résumé, l'avantage principal des agriculteurs résulte du fait que l'eau usée est une source d'eau fiable, même en années très sèches, et que sa valeur nutritive peut donner un rendement élevé, de bonne qualité sans ou avec une quantité limitée d'engrais.

8 LES BOUES RESIDUAIRES

Les efforts pour réduire la pollution des fleuves, des lacs et des océans par le traitement des eaux usées, produisent une quantité croissante de boues résiduaires; matières solides, qui sont enlevées de l'eau usée pour produire une eau usée épurée.

8.1 Composition des boues

La composition et les microbes pathogènes qui sont les éléments clés définissant la pertinence d'une boue d'épuration pour un usage agricole (USDA, 1980) dépendent :

- de la source des boues (industriel ou domestique),
- du type de traitement des eaux résiduaires (prétraitement, primaire, secondaire, tertiaire ou avancé),
- du produit chimique utilisé pour la floculation,
- du type de traitement des boues.

Nous reprenons ci-après les quatre aspects principaux qui concerne la réutilisation des boues résiduaires.

1. La teneur en **métaux lourds** de la boue change avec le niveau des apports d'eau industrielle. Des concentrations élevées en métaux lourds (zinc, cuivre et nickel) peuvent tuer les plantes. Le cadmium peut être absorbé et accumulé par les plantes en concentration telle, qu'il peut être nocif pour les humains. Même l'eau usée domestique peut produire des boues contenant assez de métaux lourds pour limiter son utilisation continue. Par conséquent, les analyses de métaux lourds sont nécessaires pour évaluer la convenance des boues comme source d'engrais ou comme conditionneur de sol.
2. **Les microbes pathogènes.** Virus, helminthes, protozoaires et bactéries. Dans la plupart des pays du Proche Orient, les microbes pathogènes sont le facteur principal d'inquiétude. En particulier, les oeufs de quelques parasites à longue durée de vie et très résistants aux températures élevées peuvent être présents, même après le séchage des boues en couches minces ou après compostage. Les agriculteurs doivent être informés du risque, de façon à gérer l'utilisation des boues avec soin. Des mesures conservatoires telles que le port de gant et de bottes de protection devraient être considérées comme mesures obligatoires.
3. **La salinité.** Dans certains cas, la salinité peut être élevée et l'apport total de boues sur les terres agricoles est calculé sur base du niveaux de salinité et non pas sur base de la teneur en N de la boue.
4. **Les nutriments.** La boue peut contenir des niveaux élevés en certains éléments qui peuvent endommager les récoltes (B et autres métaux) et l'environnement (N). Ces constituants devraient être pris en considération, en particulier dans des zones sensibles, lorsque la quantité globale de boue est calculée par unité de surface et par an.

8.2 Les boues comme engrais et conditionneur de sol

Le boue, appliquée de façon à apporter les besoins en azote de la culture, fournira la plupart des nutriments à la plante, excepté le potassium. Cependant, il est peu probable que la boue d'épuration soit employée pour fournir tous les besoins nutritifs de la culture en raison des grandes quantités qui devraient être appliqués. D'autres facteurs peuvent limiter la quantité de boue appliquée annuellement.

La valorisation maximum des boues est réalisée lorsqu'elle est appliquée en combinaison avec les engrais minéraux; de cette façon, les boues répondent partiellement aux exigences nutritives de la culture et servent également d'excellent conditionneur des terres agricoles et au maintien de la productivité du sol. La boue et le compost de boue sont connus pour améliorer les propriétés physiques de sol, comme démontré par une augmentation des agrégats, une aération accrue de sol, une densité apparente plus faible, moins de croûte de battance, ainsi qu'une augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol, de sa teneur et de sa rétention en eau. Les boues ajoutées aux sols sableux augmenteront l'eau disponible pour les plantes et réduiront le besoin d'irrigation à cause de l'accroissement de la capacité de rétention en eau du sol. Dans les sols lourds à texture argileuse, la matière organique supplémentaire augmentera la perméabilité du sol à l'eau et à l'air, augmentera l'infiltration de l'eau dans le profil de sol, tout en réduisant au minimum le ruissellement des eaux en surface, et augmentera le développement des racines et la profondeur d'enracinement.

Le bénéfice tiré de l'apport l'azote et d'autres éléments contenus dans les boues peut être approché par un simple calcul. L'azote est habituellement le facteur limitant et le plus communément utilisé pour les calculs. Plusieurs faits doivent être établis pour effectuer de tels calculs.

Besoins en N des cultures

Le besoin en azote des cultures est estimé en tenant compte des points suivant :

- Fertilité du sol. La quantité d'azote fournie par le sol (y compris le compost précédemment appliqué, les résidus de récolte, le fumier et les engrais chimiques) doit être estimée.
- Le rendement attendu (annexe IV)

La quantité d'azote disponible pendant la période initiale de croissance, apportée par les boues appliquées, peut être estimée comme suit:

$$\% \text{ N disponible} = 0,1 \times \% \text{ N organique}$$

L'azote minéral des boues, immédiatement disponible par la plante, est estimé à 10%. Alternativement, le pourcentage d'azote minéralisable peut être déterminé plus exactement par la technique d'incubation, en utilisant le sol spécifique sur lequel la boue sera ajoutée.

La minéralisation de l'azote organique des applications précédentes de boue ou de compost fournira une partie considérable des besoins en N par rapport à ce qui est

fourni par l'application actuelle (USDA, 1980). La minéralisation en deuxième année du compost de boue est d'environ 5% de l'N organique restant et on estime que 2% de l'N organique restant minéralisera ensuite annuellement après la deuxième année. Les niveaux d'N disponible pour une application de boue contenant 1,0 % d'N organique sont indiqués au tableau 24. Si l'agriculteur utilise la boue comme seule source d'N et que la culture exige 100 kilogrammes N/ha, il devra appliquer 100 tonnes/ha la première année, environ 60 tonnes/ha les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} année, et 30 tonnes/ha ensuite. Ceci permettra d'établir l'équilibre de minéralisation, et à ce moment-là, la quantité de N disponible égalera la quantité de N appliquée. L'utilisateur pourrait également compléter les besoins d'azote avec un fertilisant, selon sa disponibilité et son coût. L'utilisateur devrait savoir que, en plus de la disponibilité de l'azote, les métaux lourds et l'accumulation de sel devraient être considérés dans la détermination des quantités de boues ou de compost favorables.

Tableau 24. N disponible à partir d'une simple application de boue au taux indiqué*.

| Application de boue (matière sèche Tonnes/ha) | Total N appliqué (kg) | N disponible (kg) | | |
|---|-----------------------|-------------------|----------------|------------------|
| | | Première année | Deuxième année | Années suivantes |
| 20 | 200 | 20 | 9 | 3 |
| 40 | 400 | 40 | 18 | 7 |
| 100 | 1000 | 100 | 45 | 17 |
| 200 | 2000 | 200 | 89 | 34 |

* Les taux de minéralisation sont de 10 %, 5 % et 2 % respectivement la première, la deuxième et les années suivantes.

Les boues résiduaires peuvent fournir, en plus des matières organiques et de l'N, d'autres macroéléments (P, K, Ca, Mg) et des micronutriments (Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, et B).

L'utilisation excessive des boues (>50% en volume) est inutile et peut causer une toxicité en sel. Si une telle situation se produit, alors le lessivage est recommandée.

8.3 Contraintes à l'utilisation

8.3.1 *Microorganismes pathogènes.*

En raison de son origine, la boue d'épuration peut ne pas être acceptée par les agriculteurs et le public du point de vue des aspects esthétique ou sanitaire. Les réserves sont généralement les odeurs répugnantes et l'apparence des boues. C'est une des raisons pour laquelle le compostage des boues est encouragé. En outre, si le compostage est correctement réalisé, il détruit ou ramène tous les microbes pathogènes primaires présents dans la boue d'épuration à un niveau insignifiant. Une fois détruits, les virus, les helminthes, les protozoaires et la plupart des bactéries ne peuvent pas repeupler le compost, puisqu'ils ne peuvent pas se développer à l'extérieur de leur hôte. Les salmonelles, un des organismes les plus communs à l'origine d'intoxications alimentaires, peuvent recroître jusqu' à un degré limité dans le compost mûr, mais elles sont concurrencées par d'autres micro-organismes présents.

8.3.2 Métaux lourds.

La boue d'épuration peut contenir, selon l'origine, de grandes quantités de métaux lourds, qui peuvent réduire la valeur des boues comme engrais pour application directe sur les terres agricoles ou pour le compostage. Des quantités excessives de ces métaux sont souvent trouvées dans les boues lorsque des effluents industriels sont déchargés dans les égouts sans traitement primaire. L'application de boues riches en métaux lourds sur les terres agricoles a comme conséquence l'enrichissement du sol en métaux lourds. L'enrichissement du sol en zinc, cuivre et nickel peut causer des effets phytotoxiques directs qui se manifestent par la décroissance du rendement, particulièrement lorsque le pH est faible (pH 5,5) et les taux d'application sont élevés. Les métaux lourds peuvent également s'accumuler dans les tissus végétaux et entrer dans la chaîne alimentaire par l'ingestion directe par des humains ou indirecte par des animaux.

L'élément inquiétant pour la santé humaine, lorsque la boue d'épuration et le compost de boues sont appliqués sur le sol, est le cadmium (Cd), puisqu'il est aisément absorbé par la plupart des cultures et n'est généralement pas phytotoxique aux concentrations normalement rencontrées. Par conséquent, le Cd peut s'accumuler dans les plantes et entrer dans la chaîne alimentaire plus aisément que d'autres métaux tels que le plomb (Pb) ou le mercure (Hg), qui ne sont pas aisément absorbés et ne sont pas transférés à la partie comestible de la plante.

Des espèces ainsi que des variétés se sont avérées différentes dans leur capacité d'absorber et de transférer les métaux lourds, pour les accumuler dans les organes comestibles de la plante et pour résister à leurs effets phytotoxiques. À cet égard, les agriculteurs doivent se rappeler ce qui suit:

- les légumes feuilles sont habituellement sensibles aux effets toxiques des métaux lourds et les accumulent, la plupart du temps, dans la partie feuillue;
- les céréales grain, le maïs, et le soja sont moins sensibles;
- les herbes sont relativement tolérantes.

Les études d'assimilation sur maïs, soja et céréale grain ont prouvé que les métaux lourds s'accumulent moins dans le grain comestible que dans les feuilles; des résultats semblables ont été trouvés pour les racines comestibles comme radis, navet, carotte, et pomme de terre, et les fruits, comme la tomate, la courge etc...

La disponibilité des métaux lourds dans les sols, pour l'assimilation par des plantes, est influencée par certaines propriétés chimiques et physiques du sol, particulièrement le pH, la teneur en matière organique, la capacité d'échange cationique (CEC) et la texture (c.-à-d., les proportions de sable, limon et argile). La phytotoxicité des métaux lourds dans les boues est plus élevée dans les sols acides que dans les sols neutres ou alcalins. Le maintien du pH dans la gamme de 6,5 ou plus élevé par le chaulage, réduit la disponibilité des métaux lourds. Évidemment, dans les sols calcaires, les métaux lourds sont rendus indisponibles et le problème devient insignifiant. L'application d'amendements organiques tels que le fumier ou les résidus de récolte peut également diminuer la disponibilité en métaux lourds. La CEC est une mesure de la capacité du sol de maintenir les cations; une valeur élevée de CEC est habituellement associée à une teneur plus élevée en argile et en matière organique.

Les métaux lourds sont généralement moins disponibles pour les plantes dans les sols à CEC élevée (par exemple, les sols riches en matière organique ou argilo limoneux) comparés aux sols à CCE faible (par exemple, sols limono sableux).

Le tableau 25 montre les apports cumulatifs maximum recommandés en métaux lourds en provenance des boues, pour les terres agricoles, en fonction de la capacité d'échange cationique du sol (recommandations de l'USDA). Les sols dans la gamme de CCE de 0 à 5, sont sableux à sablo-limoneux ; la gamme de 5 à 15 inclut les sols sablo-limoneux, limoneux et argilo-limoneux; et celle > 15 inclut les sols argilo-limoneux et argileux. Un apport plus élevé en métaux serait raisonnablement permis sur des sols à texture plus lourde. L'apport de cadmium sur le sol ne devrait pas excéder 2 kg/ha.an pour les boues ou le compost de boues séché et ne devrait pas excéder les apports cumulatifs montrés au tableau 25. La boue et le compost de boues ne devraient pas être appliqués sur les sols utilisés pour cultiver le tabac parce que cette culture transfère une quantité élevée de Cd aux humains. Les boues et composts employés sur les terres agricoles pour produire des légumes feuilles devraient avoir une concentration faible en Cd et un rapport Cd/Zn faible pour réduire au minimum les effets sur les humains.

Tableau 25. Apports cumulatifs maximum recommandés en métaux lourds en provenance des boues et du compost de boues sur les terres agricoles (USDA, 1980).

| Métal | Capacité d'Echange Cationique du sol (meq/100g)* | | |
|-------|--|--------|------|
| | 0 – 5 | 5 – 15 | > 15 |
| | (Apport Maximum en métaux, kg/ha) | | |
| Pb | 500 | 1000 | 2000 |
| Zn | 250 | 500 | 1000 |
| Cu | 125 | 250 | 500 |
| Ni | 50 | 100 | 200 |
| Cd | 5 | 10 | 20 |

* CEC déterminée avant l'application des boues, en utilisant l'acétate neutre d'ammonium (1 N) et est exprimée ici comme une moyenne pondérée sur une profondeur de 50cm.

9 GLOSSAIRE

| | |
|--|---|
| Lagunage aéré | C'est une adaptation de l'étang de stabilisation dans lequel l'oxygène est ajouté par des aérateurs mécaniques. |
| Alcalinité | La capacité de l'eau de neutraliser les acides; une propriété donnée par les carbonates, les bicarbonates, les hydroxydes, et de temps en temps les borates, les silicates et les phosphates. Elle est exprimée en milligrammes équivalent par litre de carbonate de calcium. |
| Eau disponible | La partie de l'eau du sol qui peut être aisément absorbée par les racines de la plante. C'est la différence entre la capacité de champ (CC) et le point de flétrissement (PF). |
| Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅) | (1). La quantité d'oxygène utilisée dans l'oxydation biochimique de la matière organique après 5 jours, à une température indiquée et sous certaines conditions. 2) Un test standard utilisé pour évaluer la qualité biologique de l'eau usée. Plus la valeur de la DBO est faible, meilleure est la qualité de l'eau. |
| Capacité d'Echange Cationique (CEC) | La somme de cations échangeables qu'un sol peut adsorber, exprimée en milliéquivalents par 100 grammes de sol ou en millimoles de charge positive par kilogramme de sol. La CEC est directement liée à la capacité d'un sol de retenir les cations lorsqu'il y a lessivage. La CEC est également employée pour calculer le pourcentage de sodium échangeable (PSE) - une mesure du risque lié à la présence de sodium en excès dans le sol. |
| Demande Chimique en Oxygène (COD) | Une mesure quantitative de la quantité d'oxygène requise pour l'oxydation chimique des matières carbonées (organiques) dans l'eau usée en utilisant des sels de dichromate ou de permanganate comme oxydants, par un essai de deux heures. |
| Bactéries Coliformes | Groupe de bactéries de la région entérique des mammifères utilisés comme indicateur de pollution fécale. |
| Dénitrification | La conversion biologique du nitrate ou du nitrite en N ₂ ou N ₂ O gazeux. |
| Effluent | Eau usée partiellement ou complètement traitée sortant d'une installation de traitement, d'un réservoir, ou d'un bassin. |
| Conductivité électrique EC_w de l'eau EC_e du sol | Une mesure de salinité exprimée en millimhos par centimètre (mmho/cm) ou decisiemens par mètre (dS/m) à 25°C. Empiriquement reliée aux matières dissoutes |

totales, exprimées en mg/l, par la relation :
 $MDT \text{ (mg/l)} = \text{la EC (dS/m)} \times 640.$

| | |
|--|--|
| Evapotranspiration (ET) | La perte combinée d'eau, d'une zone et pendant une période donnée, par évaporation de la surface du sol et par la transpiration des plantes. ETo est la référence représentant l'évapotranspiration d'une surface couverte d'un gazon de la taille uniforme, de 8 à 15 centimètres, poussant activement, complètement ombragé et ne souffrant pas d'un manque d'eau. Ep ou Epan est l'évaporation d'une cuve d'évaporation standard. |
| Pourcentage de Sodium Echangeable (PSE) | Le rapport (en pour cent) du sodium échangeable aux autres cations échangeables dans le sol. |
| capacité au champ (CC) | Le pourcentage de l'eau (poids ou volume) restant dans un sol 2 à 3 jours après avoir été saturé et après que le drainage libre ait pratiquement cessé. Pour beaucoup de sols, CC est dans la gamme de 1/10 à 1/3 bar du potentiel de l'eau dans le sol. |
| Conductivité hydraulique | La vitesse à laquelle l'eau traverse le sol par unité de gradient de charge hydraulique. |
| Immobilisation | La conversion d'un élément inorganique sous forme organique dans les tissus microbiens ou végétaux. Souvent utilisés pour décrire la conversion du nitrate ou de l'ammonium sous forme organique dans les micro-organismes du sol. |
| Infiltration | <ol style="list-style-type: none">(1) La pénétration verticale de l'eau dans le sol.(2) L'écoulement ou le mouvement de l'eau par les pores d'un sol ou de tout autre milieu poreux.(3) La quantité d'eau souterraine qui fuit par les joints d'une canalisation, murs poreux, ou fissures.(4) l'entrée de l'eau de la terre dans une galerie. |
| Taux d'infiltration | <ol style="list-style-type: none">(1) Caractéristique du sol décrivant la vitesse maximum à laquelle l'eau pénètre dans le sol sous certaines conditions, y compris en présence d'excès d'eau. Il a les dimensions d'une vitesse, c.-à-d., cm/h ou cm/sec. Autrefois, la capacité d'infiltration.(2) le taux d'infiltration, habituellement exprimé en m³/sec par km de voie d'eau, auquel les eaux souterraines entrent dans un fossé ou une galerie d'infiltration, drain, égout ou tout autre conduit souterrain. |
| Application sur le sol | La réutilisation, le traitement ou l'élimination de l'eau usée sur le sol dans des conditions commandées. |

| | |
|-----------------------------------|---|
| Elimination par le sol | Application d'eau usée brute ou traitée, de boue ou de déchets solides sur les sols et/ou substrats sans production des produits agricoles utilisables. |
| Fraction de lessivage (FL) | La fraction d'eau appliquée sur le sol qui lessive les sels sous la profondeur d'enracinement. |
| Besoins de lessivage (BL) | Quantité d'eau pour maintenir la salinité moyenne de la zone racinaire sous le seuil phytotoxique pour une culture spécifique. |
| Minéralisation | La conversion d'un élément organique sous forme inorganique (par exemple, la conversion de l'azote organique de l'eau usée en ammonium par décomposition microbienne). |
| Perméabilité | La facilité avec laquelle le gaz, les liquides ou les racines des plantes pénètrent ou traversent un horizon de sol. |
| pH | Le degré d'acidité ou d'alcalinité dans l'eau. |
| Traitement primaire | <p>(1) Le premier traitement principal dans une station d'épuration des eaux résiduaires, habituellement une sédimentation, sans oxydation biologique,</p> <p>(2) l'élimination d'une quantité substantielle de matières en suspension mais peu ou pas de matière colloïdale et dissoute.</p> <p>(3) processus de traitement des eaux résiduaires se composant habituellement d'une sédimentation avec ou sans traitement chimique pour accomplir la séparation solide-liquide. Voir également le traitement secondaire et le traitement tertiaire.</p> |
| Infiltration rapide | Un type de traitement par le sol dans lequel l'eau est appliquée, sur un sol relativement poreux, à des vitesses d'apport bien supérieures à l'irrigation normale des cultures. |
| Traitement secondaire | <p>(1) D'une façon générale, un niveau de traitement qui produit des rendements d'élimination de la DBO et des matières en suspension de 85%.</p> <p>(2) parfois désigné par "traitement biologique des eaux résiduaires", dont la boue activée est le processus le plus courant. Généralement appliqué au traitement qui consiste principalement en un processus biologique, suivi d'une clarification avec collecte et manutention séparées des boues.</p> |
| Boue | Matières solides (ayant souvent une teneur élevée en eau) qui sont formées lorsque des eaux résiduaires sont immobiles de sorte que les solides plus denses précipitent. |

| | |
|--|--|
| | Produit de divers procédés de traitement. |
| Pourcentage de Sodium Absorbé SAR | <p>Une mesure de la quantité de sodium par rapport à la quantité de calcium et de magnésium dans l'eau ou dans l'extrait de sol saturé. Il est défini comme suit:</p> $\text{SAR} = \text{Na} / [(\text{Ca} + \text{Mg}) / 2]^{1/2}$ <p>Où les concentrations en Na, Ca et Mg sont exprimées en milliéquivalents/litre. Le SAR peut être employé pour prévoir le pourcentage échangeable de sodium d'un sol équilibré par une solution donnée.</p> |
| Structure du sol | La combinaison ou l'arrangement de particules primaires du sol dans les particules secondaires ou les agrégats. Ces unités secondaires sont classifiées par des morphologues du sol sur base de la taille, de la forme et du degré de différenciation. |
| Traitement des eaux usées | Eau usée qui, en raison du traitement, convient pour un usage profitable. |
| Texture du sol | La proportion relative de sable, limon et argile dans un sol - particules minérales classées. |
| Teneur en eau du sol | La quantité d'eau du sol, perdue lors du séchage à poids constant à 105°C, exprimée en g d'eau par g de sol sec ou cm ³ d'eau par cm ³ de sol. Sur le terrain, la teneur en eau est souvent exprimée en pour cent du poids sec. Ceci peut mener à une ambiguïté lorsqu'on ne précise pas si la base de calcul employée est le poids ou le volume. |
| Matières Totales Dissoutes (MTD) | La somme de tous les solides dissous dans l'eau ou l'eau usée est une expression de la salinité de l'eau en mg/l. Empiriquement reliées à la conductivité électrique (EC) en multipliant par 640. |
| Irrigation avec les eaux usées | Application de l'eau usée sur le sol avec pour but principal de maximiser la production végétale par unité d'eau appliquée. Souvent utilisée dans un sens plus large pour caractériser le traitement par le sol et l'élimination des eaux usées lorsque la production agricole est un objectif secondaire. |
| Valorisation des eaux usées | Processus de traitement des eaux usées pour une utilisation bénéficiaire, son transport et son utilisation réelle. |
| Réutilisation des eaux usées | Utilisation complémentaire d'une eau déjà utilisée une fois. |

10 REFERENCES

- Abdel-Hafez et al, 1986. Prevalence of Intestinal Parasitic Infections in Riyadh District, Saudi Arabia. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 80, 630-634.
- Al Salem, Saqer 1998. Report of Mission to Oman, December 1998, CEHA/Amman.
- Ali-Shrayeh et. al, 1989. Prevalence and Seasonal Fluctuations of Intestinal Parasitic Infections in the Nablus Area, West Bank of Jordan. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 83, 67-72.
- Ayers, R.S. 1977. Quality water for irrigation. *J. Irrig. Drain. Div., ASCE*: 135-154.
- Biswas A.K. 1987. Role of wastewater reuse in planning and management. In A.K. Biswas and A. Arar (Eds) *Treatment and reuse of sewage effluent for irrigation*. Butterworth Scientific Guildford, U.K.
- Blumenthal, U.J., M. Strauss, D.D. Mara and S. Cairncross. 1989. Generalized model of the effect of different control measures in reducing health risks from waste reuse. *Wat. Sci. Tech.* 21:567-577.
- Chandler, A.C., 1954. A Comparison of Helminth and Protozoan Infections in two Egyptian Villages Two Years after the Installation of Sanitary Improvements in one of them. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 3, 59-73.
- Chris Smith, 1990.. "Geohelminth Infection in the Gaza Strip." *Proceedings of Water and Sanitation Study Day, 22 March 1990, Save the Children Federation. Birzeit University*
- EPA. 1992 Guidelines for wastewater reuse; WASH Technical Report No. 81, September 1992.
- FAO, 1984. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 24, FAO, Rome.
- FAO, 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage paper 29, Rev. 1., FAO, Rome.
- FAO, 1990. Protected cultivation in the Mediterranean climate. FAO *Pant Production and Protection* paper 90, FAO, Rome.
- FAO, 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. *Irrigation and Drainage paper 46*. Rome.
- FAO, 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO *Irrigation and Drainage paper 47*, FAO, Rome.
- FAO, 1998. Irrigation in the Near East Region in Figures. *Water Report 9 / (AQUASTAT)*.
- FAO/RNEA, 1991. Wastewater management for irrigation. *Tech. Bul. No. 1.*, p.15.
- FAO/RNEA, 1991. Wastewater use and human health. *Tech. Bul. No. 3.*, p.22.
- FAO/RNEA, 1992. Irrigation methods, crops and practices using wastewater. *Tech. Bul. No. 4.*, p.20.
- FAO/RNEA, 1992. Treatment of wastewater used for irrigation. *Tech. Bul. No. 2.*, p.33.
- FAO/RNEA, 1992. Wastewater as a crop nutrient source. *Tech. Bul. No. 5.*, p.15.
- FAO/RNEA, 1993. Considerations of wastewater reuse system for irrigation. *Tech. Bul. No. 7.*, p.18.

- FAO/RNEA, 1993. Monitoring wastewater quality for irrigation. Tech. Bul. No. 6., p.23.
- FAO/RNEA, 1995. Wastewater management for agricultural production and environmental protection in the Near East Region. FAO Regional office, Cairo, Egypt.
- Feachem, R. G. 1983. Bradley, D.J., Garelick, H., and Mara, D.D. Sanitation and Diseases: Health Aspects of Excreta and Wastewater Management. Chichester, John Wiley.
- Goldberg D., Bornat, B and Bar-Yosef, 1971. Distribution of roots, water and minerals as a result of trickle irrigation. J. Am. Soc. Hort. Sci., 96:645-648.
- Kypris, D., 1989. Considerations of the quality standards for the reuse of treated effluents. In Proceedings of Wastewater Reclamation and Reuse. Cairo, Egypt 11-16 Dec. 1988.
- Maas, E.V., 1984. Salt tolerance of plants. The handbook of land science in agriculture. B.R. Christie (Ed). CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Mara, D. and S. Cairncross, 1989. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture: Measures for public health protection.
- Mara, D. and S. Cairncross. 1988. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture: Methods of public health protection. IRCWD News. 24/25: 4-12.
- National Academy of Science USA-National Academy of Engineering, 1973. Water quality criteria. 232-253.
- Papadopoulos, I. and Y. Stylianou. 1988. Treated effluent as a source of N for trickle irrigated sudax. Plant and Soil 110: 145-148.
- Papadopoulos, I. and Y. Stylianou. 1991. Trickle irrigation of sunflower with municipal wastewater. Agric. Water Manag. 19:67-75.
- Pettygrove, G.S. and T. Asano (Ed). 1984. Irrigation with reclaimed municipal wastewater - A Guidance Manual. Report No. 84 - 1 wr, California State Water Resources Control Board, Sacramento.
- Rhoades, J.D. 1977. Potential of using saline agricultural drainage for irrigation. In Proc. Water management for irrigation and drainage. ASAE, Reno, Nevada, July 1977:85-116.
- Shuval, H.A., A. Adin, B. Fattal, E. Ravitz and P. Yekutieli. 1986. Wastewater irrigation in developing countries. Health effects and technical solutions. Technical Paper No. 51. Washington D.C. : The World Bank.
- UNEP-FAO. 1991. Environmental guidelines for municipal wastewater reuse in the Mediterranean region. Split. pp.127.
- USDA, 1980. Manual for composting sewage sludge by the Beltsville aerated-pile method. P. 65.
- WHO, 1973. Group of Experts. "Reuse of Effluents: Methods of Wastewater Treatment and Health Safeguards: World Health Organization, Technical Report Series No. 517, Geneva, 1973.
- World Health Organization, (WHO). 1989. Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture. Technical Report Series No. 778. WHO, Geneva.

ANNEXE I

Constituants d'intérêt spécial dans le traitement des eaux résiduaires et de l'irrigation avec des eaux usées traités

| Constituent | Paramètres mesurés | Raison de l'intérêt |
|--|--|---|
| Matières en suspension | Matière en suspension, y compris matières volatiles et fixes | Les solides en suspension peuvent mener au développement des dépôts de boues et de conditions anaérobies lorsque l'eau usée non traitée est rejetée dans l'environnement aquatique. Les quantités excessives de matières en suspension causent le colmatage des systèmes d'irrigation. |
| Matières organiques biodégradables | Demande Biochimique en Oxygène, Demande Chimique en Oxygène | Composé principalement de protéines, d'hydrates de carbone, et de graisses. Si elles sont rejetées dans l'environnement, leur décomposition biologique peut mener à l'épuisement de l'oxygène dissous des eaux réceptrices et au développement de conditions septiques. |
| Pathogènes | Organismes indicateurs, coliformes totaux et fécaux | Les maladies contagieuses peuvent être transmises par les microbes pathogènes dans l'eau usée: bactéries, virus, parasites. |
| Nutriments | Azote, Phosphore, Potassium | L'azote, le phosphore et le potassium sont les nutriments essentiels à la croissance des plantes et leur présence augmente normalement la valeur de l'eau pour l'irrigation. Une fois déchargés dans l'environnement aquatique, l'azote et le phosphore peuvent mener à la croissance d'une vie aquatique indésirable. Une fois déchargé en quantités excessives sur les sols, l'azote peut également mener à la pollution des eaux souterraines. |
| Matières organiques stables (réfractaires) | Composés spécifiques (par exemple, phénols, pesticides, hydrocarbures chlorés) | Ces produits organiques résistent à des méthodes conventionnelles de traitement des eaux résiduaires. Quelques composés organiques sont toxiques dans l'environnement et leur présence peut limiter la convenance de l'eau usée pour l'irrigation. |
| L'activité de l'ion hydrogène | pH | Le pH de l'eau usée affecte la solubilité des métaux ainsi que l'alcalinité des sols. La gamme normale dans l'eau usée municipale est pH = 6.5 à 8,5, mais les eaux usées industrielles peuvent modifier le pH de manière significative. |
| Métaux lourds | Éléments spécifiques (par exemple: Cd, Zn, Ni, Hg) | Quelques métaux lourds s'accumulent dans l'environnement et sont toxiques pour les plantes et les animaux. Leur présence peut limiter la convenance de l'eau usagée pour l'irrigation. |
| Matières minérales dissoutes | Matières totales dissoutes, conductivité électrique, éléments spécifiques (par exemple: Na, Ca, Mg, Cl, B) | La salinité excessive peut endommager certaines cultures. Les ions spécifiques tels que le chlorure, le sodium, le bore sont toxiques pour certaines cultures. Le sodium peut poser des problèmes de perméabilité du sol. |
| Chlore résiduel | Chlore libre et combiné | Des quantités excessives de chlore disponible libre (>5 mg/l de Cl ₂) peuvent causer des nécroses foliaires et endommager certaines cultures sensibles. Cependant, la plupart du chlore dans l'eau usée épurée est sous une forme combinée, qui n'endommage pas les cultures. Quelques inquiétudes existent quant aux effets toxiques des matières organiques chlorées en regard de la contamination des eaux souterraines. |

* Pettygrove, G.S. et T. Asano, 1984

ANNEXE II

Directives de qualité de l'eau usée pour l'irrigation à Chypre

| Irrigation{PRIVAT E } | DBO mg/l | MES mg/l | Coliformes fécaux /100ml | Oeufs Intestinaux oeufs/l | Traitement requis |
|---|----------------|-------------|-----------------------------|---------------------------------|---|
| Toutes cultures(1) | A) 10* | 10* | 5* 15** | Nil | Secondaire, tertiaire et désinfection |
| Les aires d'agrément à l'accès illimité et les légumes mangés cuits (2) | A) 10* 15** | 10* 15** | 50* 100** | Nil | Secondaire, tertiaire et désinfection |
| Cultures pour la consommation humaine. Aires d'agrément à accès limité | A) 20* 30** | 30* 45** | 200* 1000** | Nil | Secondaire et stockage >1 semaine et désinfection ou tertiaire et désinfection |
| | B) - | - | 200* 1000* | Nil | Stabilisation – bassin de maturation temps de rétention >30 jours ou secondaire et stockage >30 jours |
| fourrages | A) 20* 30** | 30* 45** | 1000* 5000** | Nil | Secondaire et stockage >1 semaine ou tertiaire et désinfection |
| | B) - | - | 5000* | Nil | Stabilisation – bassin de maturation temps de rétention >30 jours ou secondaire et stockage >30 jours |
| Cultures industrielles | A) 50* 70** | - - | 3000* 10000** | - - | Secondaire et désinfection Stabilisation – bassin de maturation temps de rétention >30 jours ou |
| | B) - | - | 3000* 10000** | - - | secondaire et du stockage >30 jours |

A. Méthodes de traitement mécanisé (boues activées etc.)

B. Étangs de stabilisation

* Ces valeurs ne doivent pas être dépassées dans 80% des échantillons par mois. Le nombre minimum des échantillons est 5.

** Valeur maximum autorisée

1. Irrigation de légumes feuilles, bulbes mangés crus non autorisés

2. Pomme de terre, betteraves, colocasia

note: Aucune substance s'accumulant dans les parties comestibles des cultures et avérée être toxique aux humains ou aux animaux n'est autorisée dans l'effluent

ANNEXE III

Code de bonnes pratiques pour le traitement et l'utilisation d'effluents domestiques pour l'irrigation (cas de Chypre)

A. Traitement

1. Le traitement et la désinfection des eaux usées doivent être maintenus sans interruption de façon satisfaisante et efficace aussi longtemps que les effluents traités sont utilisés en irrigation et selon le permis publié sous la législation existante.
2. Des opérateurs habiles doivent être employés pour faire fonctionner la station d'épuration et de désinfection, suivant l'approbation formelle par l'autorité compétente que les personnes sont qualifiées pour exécuter les fonctions requises, nécessaires à la satisfaction des conditions (1).
3. La station d'épuration et de désinfection doit être vérifiée chaque jour selon le programme publié par l'autorité et les données de toutes les opérations effectuées selon les instructions de l'autorité compétente devront être conservées. Une copie doit être gardée pour l'accès facile dans les équipements de traitement.
4. Toutes les sorties, les robinets et les valves du réseau d'irrigation doivent être sécurisées pour empêcher leur utilisation par les personnes non autorisées. Toutes ces sorties doivent être peintes en rouge ou en pourpre et clairement marquées de façon à avertir le public que l'eau n'est pas potable.
5. Aucun raccordement avec une canalisation transportant de l'eau potable n'est autorisé. Toutes les canalisations transportant l'eau usée doivent être marquées d'une bande rouge de façon à les distinguer de l'approvisionnement en eau domestique. Dans les cas inévitables où l'effluent et les canalisations d'approvisionnement d'eau potable doivent être posés, l'une proche de l'autre, les canalisations d'eaux usées devraient être enterrées au moins 0,5 m au-dessous de la canalisation d'eau domestique.

B. Utilisation de l'eau usée traitée pour l'irrigation

Les méthodes d'irrigation admises et les conditions d'application diffèrent selon les cultures comme suit:

1. Parc ornementaux, pelouses et aires d'agrément à accès illimité

- Irrigation souterraine.
- Irrigation goutte à goutte.
- Arroseurs escamotables, basse pression et pluviométrie élevée, angle faible (moins de 11 degrés). L'arrosage doit se pratiquer de préférence la nuit et lorsque les gens ne sont pas présents ; il est également à éviter pendant les périodes venteuses.

2. Parcs ornementaux, pelouses et aires d'agrément à accès limité, cultures industrielles et fourrages

- Irrigation souterraine.

- Irrigation goutte à goutte.
- Irrigation par barbotage (Bubbler).
- Arroseurs escamotables.
- Irrigation de surface.
- Arroseurs de faible capacité.

l'irrigation par aspiration est autorisée avec une zone tampon d'environ 300 m.

Pour les fourrages, il est recommandé d'arrêter l'irrigation au moins une semaine avant la moisson et aucun animal laitier ne peut paître sur les pâturages irrigués avec des eaux usées. Les services vétérinaires doivent être informés.

3. Vignes

- Irrigation goutte à goutte.
- Mini asperseurs et asperseurs (au cas où les cultures sont mouillées, l'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la moisson).
- Les systèmes d'irrigation mobiles ne sont pas autorisés.
- Les fruits tombés sur le sol ne peuvent être ramassés.

4. Arbres fruitiers

- Irrigation goutte à goutte.
- Irrigation par bassin.
- Irrigation par barbotage (Bubbler).
- Mini arroseurs.

Les fruits tombés sur le sol ne peuvent être ramassés, excepté les noix. Au cas où les cultures sont humectées, l'irrigation doit s'arrêter une semaine avant la récolte.

5. Légumes

- Irrigation souterraine.
- Irrigation goutte à goutte.

Les plantes ne doivent pas entrer en contact avec le sol et l'eau usée (seulement les légumes qui sont autorisés). D'autres méthodes d'irrigation peuvent également être considérées.

6. Légumes mangés cuits

- Irrigation par aspersion.
- Irrigation souterraine.
- Irrigation goutte à goutte.

D'autres méthodes d'irrigation peuvent être autorisées après l'approbation de l'autorité compétente. Des restrictions peuvent être imposées à n'importe quelle méthode d'irrigation par l'autorité compétente, afin de protéger la santé publique et l'environnement.

C. Traitement tertiaire

1. Les méthodes de traitement tertiaires suivantes sont acceptables:

- coagulation plus floculation suivie de filtration rapide sur sable,
- filtres à sable,
- toute autre méthode qui peut assurer l'élimination des œufs d'helminthes et ramener les coliformes fécaux à un niveau acceptable. L'autorité compétente doit approuver cette méthode.

2. Des méthodes de désinfection appropriées doivent être appliquées lorsque l'eau usée doit être utilisée pour l'irrigation. Dans le cas de la chloration, le niveau de chlore libre dans l'effluent à la sortie du réservoir de chloration, après une heure de temps de contact, devrait être d'au moins 0,5 mg/l et inférieur à 2 mg/l.

3. Les installations appropriés pour la surveillance des paramètres essentiels de qualité doivent se trouver sur l'emplacement du traitement.

ANNEXE IV

Besoins nutritifs de certaines cultures

Tomate

| {PRIVATE }Rendement (tonnes/ha) | Méthode d'irrigation | kg/ha | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|-------|-----|-----|-------------------------------|------------------|
| | | N | P | K | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 50 | Goutte à goutte Raie | 227 | 67 | 184 | 153 | 380 |
| | | 333 | 133 | 208 | 306 | 435 |
| 75 | Goutte à goutte Raie | 283 | 80 | 275 | 185 | 490 |
| | | 415 | 161 | 312 | 370 | 560 |
| 100 | Goutte à goutte raie | 340 | 94 | 367 | 216 | 600 |
| | | 497 | 189 | 416 | 433 | 685 |
| 125 | Goutte à goutte raie | 396 | 108 | 459 | 248 | 710 |
| | | 579 | 216 | 520 | 496 | 810 |
| Chaque 10 tonnes additionnelles | Goutte à goutte Raie | 23 | 5.5 | 37 | 13 | 45 |
| | | 33 | 11 | 42 | 25 | 50 |

Pomme de terre

| {PRIVATE }Rendement (tonnes/ha) | Méthodes d'irrigation | kg/ha | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|-------|-----|-----|-------------------------------|------------------|
| | | N | P | K | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 40 | Aspersion Raie | 251 | 95 | 353 | 218 | 423 |
| | | 256 | 143 | 400 | 327 | 480 |
| 50 | Aspersion Raie | 289 | 113 | 406 | 260 | 487 |
| | | 409 | 170 | 460 | 390 | 552 |
| 60 | Aspersion Raie | 327 | 131 | 459 | 301 | 550 |
| | | 463 | 197 | 520 | 452 | 624 |
| 70 | Aspersion Raie | 364 | 149 | 512 | 342 | 614 |
| | | 516 | 224 | 580 | 513 | 696 |
| Chaque 10 tonnes additionnelles | Aspersion Raie | 38 | 18 | 53 | 41 | 64 |
| | | 53 | 29 | 60 | 62 | 72 |

Aubergine

| {PRIVATE }Rendement (tonnes/ha) | Méthodes d'irrigation | kg/ha | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|-------|-----|-----|-------------------------------|------------------|
| | | N | P | K | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 50 | Goutte à goutte | 255 | 105 | 326 | 241 | 392 |
| | Raie | 367 | 210 | 370 | 482 | 445 |
| 75 | Goutte à goutte | 313 | 136 | 419 | 312 | 503 |
| | Raie | 456 | 272 | 476 | 625 | 572 |
| 100 | Goutte à goutte | 349 | 167 | 512 | 383 | 615 |
| | Raie | 545 | 334 | 582 | 766 | 699 |
| 125 | Goutte à goutte | 410 | 198 | 605 | 454 | 726 |
| | Raie | 633 | 396 | 688 | 908 | 825 |
| Chaque 10 tonnes additionnelles | Goutte à goutte | 24 | 12 | 38 | 28 | 45 |
| | Raie | 35 | 24 | 43 | 56 | 51 |

Citrus

| {PRIVATE }Rendement (tonnes/ha) | Méthodes d'irrigation | kg/ha | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------|-----|-----|-------------------------------|------------------|
| | | N | P | K | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 30 | Microirrigation | 183 | 39 | 160 | 89 | 192 |
| | Surface | 256 | 68 | 194 | 156 | 233 |
| 40 | Microirrigation | 203 | 44 | 178 | 101 | 214 |
| | Surface | 285 | 78 | 215 | 178 | 259 |
| 50 | Microirrigation | 223 | 50 | 196 | 114 | 235 |
| | Surface | 314 | 87 | 238 | 200 | 286 |
| 60 | Microirrigation | 243 | 55 | 214 | 127 | 257 |
| | Surface | 342 | 97 | 260 | 222 | 312 |
| 70 | Microirrigation | 263 | 61 | 233 | 139 | 279 |
| | Surface | 372 | 107 | 282 | 244 | 338 |
| 80 | Microirrigation | 283 | 66 | 250 | 152 | 300 |
| | Surface | 400 | 116 | 303 | 266 | 364 |
| 90 | Microirrigation | 303 | 72 | 268 | 165 | 322 |
| | Surface | 429 | 126 | 326 | 288 | 391 |
| Chaque 10 tonnes additionnelles | Microirrigation | 20 | 6 | 18 | 13 | 22 |
| | Surface | 29 | 10 | 22 | 22 | 26 |

Mangue

| {PRIVATE }Rendement (tonnes/ha) | Méthodes d'irrigation | kg/ha | | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|-------|------|-----|-------------------------------|------------------|
| | | N | P | K | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 20 | Microirrigation Surface | 139 | 30 | 177 | 68 | 212 |
| | | 194 | 52 | 202 | 119 | 242 |
| 25 | Microirrigation Surface | 148 | 32 | 187 | 74 | 224 |
| | | 208 | 57 | 213 | 130 | 256 |
| 30 | Microirrigation Surface | 158 | 35 | 197 | 80 | 236 |
| | | 221 | 62 | 225 | 141 | 270 |
| 35 | Microirrigation Surface | 168 | 38 | 207 | 86 | 248 |
| | | 235 | 66 | 237 | 152 | 284 |
| 40 | Microirrigation Surface | 177 | 40 | 217 | 92 | 260 |
| | | 248 | 71 | 249 | 163 | 298 |
| 45 | Microirrigation Surface | 187 | 43 | 227 | 98 | 272 |
| | | 262 | 76 | 260 | 174 | 312 |
| 50 | Microirrigation Surface | 197 | 45 | 237 | 104 | 284 |
| | | 275 | 81 | 272 | 185 | 326 |
| Chaque tonne additionnelle | Microirrigation Surface | 2.0 | 0.5 | 2.0 | 1.2 | 2.4 |
| | | 2.5 | 0.96 | 2.3 | 2.2 | 2.8 |

Banane

| {PRIVATE }Rendement (tonnes/ha) | Méthodes d'irrigation | kg/ha | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-------|-----|------|-------------------------------|------------------|
| | | N | P | K | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 40 | Microirrigation Asperseur | 388 | 117 | 1176 | 268 | 1411 |
| | | 440 | 175 | 1333 | 401 | 1600 |
| 50 | Microirrigation Asperseur | 412 | 123 | 1235 | 282 | 1482 |
| | | 467 | 185 | 1400 | 424 | 1680 |
| 60 | Microirrigation Asperseur | 435 | 130 | 1294 | 298 | 1553 |
| | | 493 | 195 | 1467 | 446 | 1760 |
| 70 | Microirrigation Asperseur | 459 | 137 | 1353 | 314 | 1624 |
| | | 520 | 205 | 1533 | 469 | 1840 |
| 80 | Microirrigation Asperseur | 482 | 147 | 1412 | 337 | 1694 |
| | | 547 | 220 | 1600 | 504 | 1920 |
| 90 | Microirrigation Asperseur | 506 | 157 | 1470 | 359 | 1764 |
| | | 573 | 235 | 1667 | 538 | 2000 |
| 100 | Microirrigation Asperseur | 529 | 167 | 1529 | 382 | 1835 |
| | | 600 | 250 | 1733 | 572 | 2080 |
| Chaque 10 tonnes additionnelles | Microirrigation Asperseur | 23 | 7 | 59 | 16 | 71 |
| | | 27 | 11 | 67 | 25 | 80 |

