

Composition des eaux usées

à vocation agricole par excellence, la réutilisation des eaux usées traitées atteint 25% des eaux épurées, évaluée à 07 millions m³/an. A la lumière des résultats encourageants et du fait de la croissance de la demande en eaux usées traitées, un projet de dédoublement de la superficie des périmètres irrigués (de 500 à 710 ha) est en cours de validation. Cependant, le sol du périmètre d'El souarekh) daïra d'El-kala, déjà pauvre en éléments organiques, est vulnérable à l'eau dont la salinité est moyennement élevée. Il est donc nécessaire d'être vigilant quant à la qualité de l'eau utilisée.

L'étude que nous présentons est une contribution à l'évaluation de l'impact de l'irrigation par les EUT au niveau de la station d'épuration d'El-kala. L'objectif de travail est d'examiner l'état des sols en termes de salinisation, d'accumulation et de phytodisponibilité des éléments métalliques. Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme national d'optimisation de la réutilisation des eaux usées traitées.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une cotutelle entre l'université d'El-Tarf, (O.N.A.S). (D.R.H Wilaya d'El_Tarf)), (direction de l'Environnement d'El-Tarf). Le choix des sites d'études et l'échantillonnage a été piloté par le l'université et les responsable de O.NAS. D'El -Kala) qui gère la réutilisation des eaux usées traitées.

Cette étude a été réalisée selon trois approches dont chacune présente une méthodologie d'échantillonnage et de caractérisation spécifique.

Une première approche axée sur l'effet général de l'irrigation par les eaux usées traités sur deux types de sols largement représentés au niveau du périmètre d'irrigation étudié (Argileuse sableuse et sableuse limoneuse). Ainsi, une caractérisation qualitative à travers la salinité, la sodicité et la fertilité a été effectuée sur des échantillons de sols prélevés de manière aléatoire et systématique à différentes profondeurs.

La deuxième approche consiste en une évaluation quantitative de la migration verticale des éléments métalliques et majeurs dans les deux types de sols irrigués par les EUT.

La troisième approche vise à étudier l'effet des pratiques agricoles sur l'accumulation et le transfert sol-plantes des métaux lourds dans les sols choisis. Ce transfert est étudié par la quantification des teneurs en métaux dans le sol, les racines et les parties aériennes de deux plantes (Tomate industrielle et Le Haricot vert) présentant des cycles de vie différents. Le travail de cette thèse fait l'objet d'une présentation en 04 chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique présente un aperçu globale de la réutilisation des eaux usées alors que le second chapitre récapitule les caractéristiques générales des sites d'étude. Le troisième chapitre présente le Matériel et Méthode bien détaillée des différentes méthodes adoptées et des protocoles d'analyses utilisés. Les résultats des différentes approches. Ils traitent donc successivement :

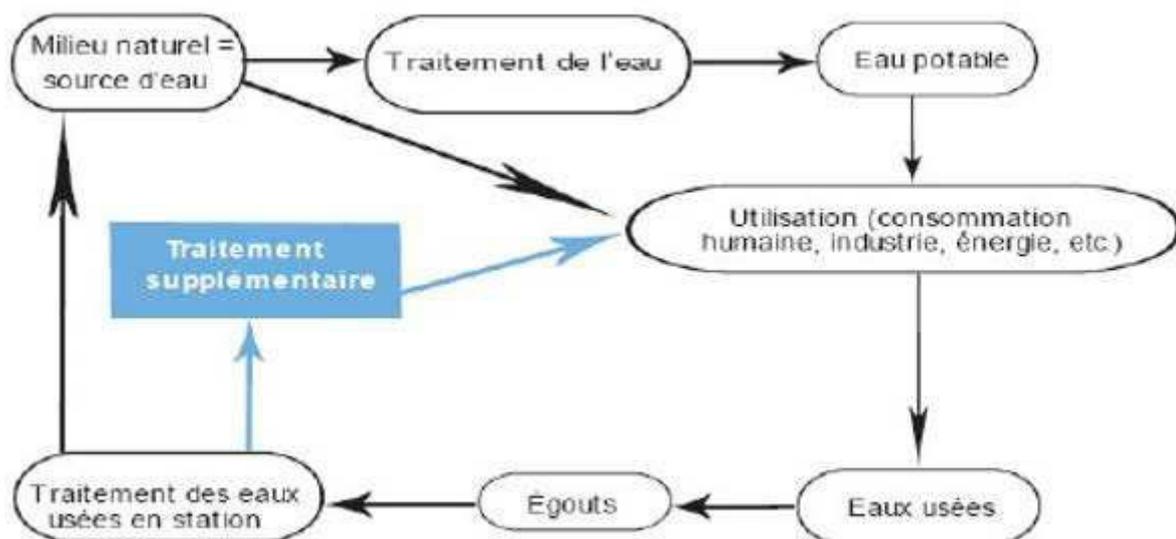
Chapitre V : Les résultats et les discussions des de notre expérimentation.

CONCLUSION GENERALE.

1. Introduction

Dans les régions souffrant de pénurie d'eau, les eaux usées ne sont plus considérées comme déchets à éliminer mais comme partie intégrante des ressources potentielles en eau. D'après la (figure I.1), la valorisation des eaux usées passe obligatoirement par deux étapes essentielles.

La première étape est la collecte des eaux usées. Cette étape nécessite l'installation d'un réseau d'égouts couvrant les différents secteurs urbains. En effet, la nature et les volumes des eaux usées collectées sont les facteurs les plus déterminants pour le choix du procédé de traitement et bien entendu, pour le dimensionnement des stations d'épuration. Ainsi, l'installation des stations d'épuration constitue la deuxième étape du schéma général de valorisation des eaux usées, bien que dans certains pays en voie de développement, ces eaux sont encore réutilisées à l'état brut. Les effluents une fois traités, au lieu d'être déversés dans le milieu naturel, vont être réutilisés pour différents usages. Dans certains pays où les normes de réutilisation sont drastiques, ces eaux usées vont subir des traitements supplémentaires pouvant aller jusqu'à la désinfection. En effet, c'est la finalité d'usage qui définit le niveau de traitement complémentaire.



Intégration des eaux usées traitées dans le cycle général des ressources en eau

La réutilisation agricole constitue la principale filière de réutilisation des eaux usées à travers le monde. Cette réutilisation trouve sa motivation en trois points essentiels :

- 1) la nécessité de réserver les eaux de bonne qualité à l'alimentation en eau potable,
- 2) la préservation des milieux naturels et 3) l'économie d'engrais chimiques en exploitant le pouvoir fertilisant de ces eaux.

La connaissance de la composition des eaux usées est une étape primordiale pour la prévention des risques inhérents à leurs diverses utilisations. Au cours de ce chapitre, la composition des eaux usées est tout d'abord présentée. Par la suite, un aperçu est donné sur la réutilisation des eaux usées traitées ainsi que sur les aspects juridiques et techniques à l'échelle nationale et internationale. Enfin,

les différents impacts sur le milieu récepteur que peut engendrer la pratique de la réutilisation des eaux usées traitées sont considérés surtout sur le plan physico-chimique.

2. Composition des eaux usées

2.1. Généralités

Les eaux usées urbaines proviennent essentiellement des activités domestiques et industrielles ainsi que des eaux souterraines et des précipitations (les réseaux étant généralement unitaires). Les eaux domestiques proviennent des activités humaines quotidiennes, alors que les eaux usées industrielles sont très variées en termes de quantité et de qualité. Leurs caractéristiques dépendent du type d'industrie et du niveau de traitement que les eaux usées subissent avant leur rejet. La composition des eaux résiduaires urbaines brutes dépend donc, en d'autres termes:

essentiellement de l'activité humaine (eaux ménagères et eaux vannes), de la composition des eaux d'alimentation en eau potable et accessoirement de la nature des matériaux entrant dans la constitution des canalisations d'eau pour quelques constituants chimiques, de la nature et de la quantité des effluents industriels éventuellement rejetés dans le réseau urbain.

Les eaux usées urbaines contiennent des matières solides, des substances dissoutes et des microorganismes. Ces derniers sont la cause des principales restrictions imposées à la réutilisation des eaux usées.

En effet, la réglementation distingue des niveaux de qualité pour les eaux usées épurées, déterminés essentiellement par les taux de concentration en microorganismes. Il est donc indispensable de connaître la composition des eaux usées afin de définir les domaines de réutilisation possibles et le niveau de restriction.

2.2. Microorganismes

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

2.2.1. Les bactéries

Les bactéries sont les microorganismes les plus communément rencontrés dans les eaux usées (Toze, 1999). Les eaux usées urbaines contiennent environ 10^6 à 10^7 bactéries/100 mL dont la plupart sont proteus et entérobactéries, 10^3 à 10^4 streptocoques et 10^2 à 10^3 clostridiums. La concentration en bactéries pathogènes est de l'ordre de 10^4 germes L-1. Parmi les plus détectées sont retrouvées, les salmonelles, dont celles responsables de la typhoïde, des paratyphoïdes et des troubles intestinaux. Les coliformes thermotolérants sont des germes témoins de contamination fécale communément utilisés pour contrôler la qualité relative d'une eau.

2.2.2. Les virus

Les virus sont des parasites intracellulaires obligés qui ne peuvent se multiplier que dans une cellule hôte. On estime leur concentration dans les eaux usées urbaines comprise entre 10^3 et 10^4

particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées restent difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel. Les virus entériques sont ceux qui se multiplient dans le trajet intestinal. Parmi les virus entériques humains les plus nombreux il faut citer les entérovirus (exemple: polio), les rotavirus, les rétrovirus, les adénovirus et le virus de l'Hépatite A. Il semble que les virus soient plus résistants dans l'environnement que les bactéries. Aulicino et al. (1996), ont constaté que, au cours de processus de traitement des eaux usées, les virus sont plus difficiles à éliminer que les bactéries classiques couramment utilisées comme indicateurs de la qualité bactériologique des eaux. De plus les auteurs ont détecté plusieurs virus dans les milieux récepteurs recevant des effluents traités tels que les rivières et les étangs. D'autre part, Blanc et Nasser (1996), ont constaté que les virus sont plus persistants, à température ambiante, dans un sol irrigué par des EUT que certains autres bactériophages.

2.2.3. Les protozoaires

Au cours de leur cycle vital, les protozoaires passent par une forme de résistance, les kystes, qui peuvent être véhiculés par les eaux résiduaires. Ces parasites sont très persistants. Ainsi, selon les conditions du milieu, ces organismes peuvent survivre plusieurs semaines voir même plusieurs années (Campos, 2008). Plusieurs protozoaires pathogènes ont été identifiés dans les eaux usées (Gennaccaro et al., 2003). Parmi les plus importants du point de vue sanitaire, il faut citer *Entamoeba histolytica*, responsable de la dysenterie amibienne, *Giardia lamblia* et *Cryptosporidium parvum* (Toze 1997, in Toze, 2006). En revanche, 10 à 30 kystes, est une dose suffisante pour causer des troubles sanitaires (Campos, 2008).

2.2.4. Les helminthes

Les helminthes sont des parasites intestinaux, fréquemment rencontrés dans les eaux résiduaires. Dans les eaux usées urbaines, le nombre d'œufs d'helminthes peut être évalué entre 10 et 103 germes L-1. Beaucoup de ces helminthes ont des cycles de vie complexes comprenant un passage obligé par un hôte intermédiaire (Toze, 2006). Le stade infectieux de certains helminthes est l'organisme adulte ou larve, alors que pour d'autres, ce sont les œufs.

Les œufs et les larves sont résistants dans l'environnement et le risque lié à leur présence est à considérer pour le traitement et la réutilisation des eaux résiduaires. En effet, la persistance de ces organismes à différentes conditions environnementales ainsi que leur résistance à la désinfection permet leur reproduction, ce qui constitue leur risque potentiel (Campos, 2008).

Les helminthes pathogènes rencontrés dans les eaux usées sont : *Ascaris lumbricades*, *Oxyuris vermicularis*, *Trichuris trichuria*, *Taenia saginata*.

L'analyse des risques sanitaires liés aux agents pathogènes susceptibles d'être transportés par les eaux usées est le fondement des recommandations proposées par l'Organisation Mondiale de la Santé en 1989 (OMS, 1989).

2.3. Eléments traces et métaux lourds

Les sources de métaux pour les milieux aquatiques sont multiples. On différencie principalement les sources d'origine naturelle et anthropique. En effet, les métaux sont présents naturellement dans les sols. Certains en sont des constituants majeurs (Al) ou importants pour la structure des minéraux (Fe, Mn) (Baize and Sterckeman, 2001; Hamon et al. 2004; Horckmans et al., 2005).

La figure I.2 montre le cycle des métaux dans l'environnement. Les principaux phénomènes naturels conduisant à la dissémination des métaux dans les compartiments environnementaux sont l'activité volcanique et l'érosion des roches (Doelsch et al., 2006). Dans le cas de l'activité volcanique, bien que la majeure partie de ces métaux retombe dans un rayon de 100 km, une partie significative atteint la stratosphère et se dissémine alors sur l'ensemble du globe terrestre (Garrett, 2000). Ainsi, par l'intermédiaire du compartiment atmosphérique, ils pourront ultérieurement atteindre les milieux aquatiques. D'autre part, l'altération chimique des roches permet une mise en circulation naturelle des métaux sous forme dissoute.

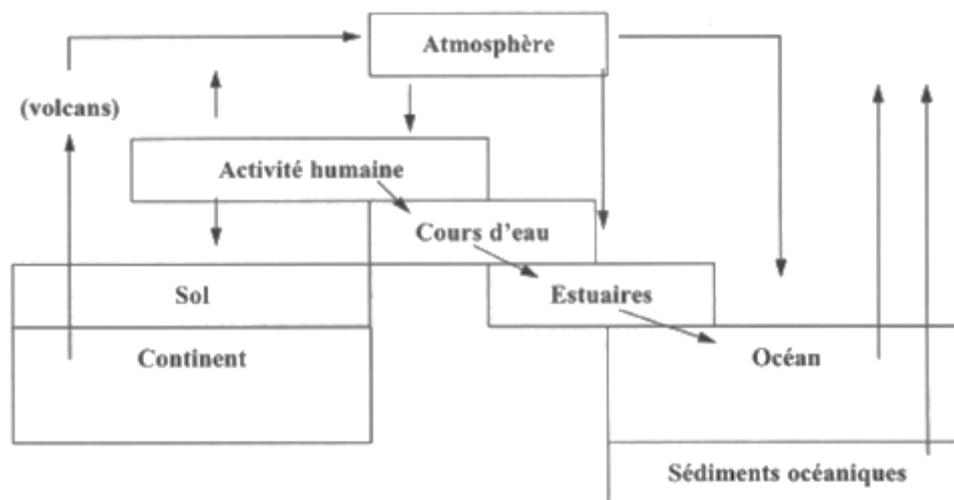


Figure I.2 : Cycle géochimique simplifié des métaux (source : Miquel, 2001)

En plus du fond géochimique, les milieux aquatiques sont enrichis en métaux par les activités humaines. Les métaux sont utilisés par l'homme comme matériaux mais également comme réactifs dans l'industrie (traitement de surface, intermédiaire réactionnel...) et l'agriculture (phytosanitaires). Les activités industrielles, ainsi que le trafic automobile émettent de fines particules métalliques dans l'atmosphère, principalement dans les zones urbaines (Azimi et al., 2005). Les métaux ainsi disséminés se déposent dans les divers compartiments environnementaux tels que les plans d'eau et les sols. Les métaux déposés sur les sols peuvent cependant atteindre les cours d'eau par ruissellement au cours des événements pluvieux.

Dans le cas du réseau unitaire de collecte des eaux usées, les eaux usées urbaines sont composées d'un mélange, d'eaux usées domestiques, d'eaux usées industrielles et d'eaux de ruissellement. Les

métaux contenus dans les eaux de ruissellement proviennent des dépôts atmosphériques mais également de la corrosion des surfaces de ruissellement (ex : toitures, gouttières) (Gromaire et al., 2001). En effet, la plupart des métaux dans les eaux de ruissellement sont majoritairement associés aux matières en suspension ou aux colloïdes (Makepeace et al. 1995). Dans les eaux industrielles, les métaux découlent directement de leur utilisation dans les procédés industriels. Ces eaux usées sont caractérisées par une importante variabilité de leur charge polluante. La charge en métaux des eaux domestiques est au contraire cyclique car elle découle de l'activité journalière des ménages. Les métaux contenus dans les eaux domestiques ont pour origine, d'une part, la corrosion des canalisations d'eau potable et, d'autre part, de l'usage des métaux dans les activités domestiques et dans des produits ménagers.

Dans certaines régions, les rejets miniers constituent, également, une source ponctuelle importante de métaux lourds (Braungardt et al., 2003 ; Figueira and Ribeiro, 2005).

Les eaux usées urbaines sont une des principales voies d'apport de métaux vers les écosystèmes aquatiques (Buzier et al., 2006). A l'entrée des stations d'épuration, une large partie des métaux contenue dans les eaux usées se trouve complexée avec la matière organique dissoute (Kunz et Jardin 2007, Giokas et al. 2011). 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, à long terme, les cultures irriguées par suite d'accumulation dans le sol (FAO, 2008).

Cependant, il faut noter que, sauf exception, telles la présence d'établissements industriels très polluants raccordés directement au réseau d'assainissement ou la réutilisation directe des eaux usées brutes, les concentrations en métaux lourds dans les eaux résiduaires traitées sont faibles et ne constituent pas un facteur limitant la réutilisation des eaux usées en irrigation (Toze, 2006). En effet, l'essentiel de ces métaux est retenu dans les boues des stations d'épuration lors du traitement des eaux usées (Faby et Brissaud, 1997).

2.4. Substances nutritives

Les nutriments se trouvent en grande quantité dans l'eau usée, et constituent un paramètre de qualité important pour la valorisation de ces eaux en agriculture et en gestion des paysages (Hamouda, 2007). Les éléments les plus fréquents dans les eaux usées sont l'azote, le phosphore et parfois le potassium, le zinc, le bore et le soufre. Ces éléments se trouvent en quantités appréciables, mais en proportions très variables que ce soit, dans les eaux usées épurées ou brutes. D'après Faby et Brissaud (2009), une lame d'eau résiduaire traitée de 100 mm peut apporter à l'hectare de terre agricole environ : de 16 à 62 kg d'azote, de 2 à 69 kg de potassium, de 4 à 24 kg de phosphore, de 18 à 208 kg de calcium, de 9 à 100 kg de magnésium, de 27 à 182 kg de sodium

D'autres macro- et micronutriments peuvent également être présents dans les eaux usées. En outre, la présence de matière organique sous différentes formes dans l'eau usée (solides en suspension, éléments colloïdaux et matières dissoutes) peut, par son effet à long terme sur la fertilité du sol, contribuer également à la stabilité structurale du sol (FAO, 2009).

Cette matière organique présente dans l'eau usée influe sur la biodisponibilité des macro- et des micronutriments qui sont essentiels à la nutrition des plantes (Toze, 2006), y-compris sur ceux se trouvant originellement dans le sol. Cependant, la valeur nutritive de l'eau usée peut excéder les besoins de la plante et constituer alors une source potentielle de pollution des eaux de nappe. Elle peut également poser des problèmes de 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, en usage agricole, l'analyse d'eau usée est requise au moins une fois au début de la saison culturale (FAO, 2003).

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. Dans ce cadre, la FAO (2003) a promulgué de nouvelles mesures : Il est recommandé de surveiller NO₃-N, NH₄-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 NO₃-N.

2.5. Autres paramètres caractéristiques

2.5.1. Matière en suspension et matière organique

Les matières en suspension (MES) sont, en majeure partie, de nature biodégradable. La plus grande part des microorganismes pathogènes contenus dans les eaux usées, est associée aux MES (FAO, 2003). Les particules en suspension peuvent, par définition, être éliminées par décantation. C'est une étape simple et efficace pour réduire la charge organique et la teneur en germes pathogènes des eaux usées. Toutefois, un traitement beaucoup plus poussé est généralement requis pour faire face aux risques sanitaires. La présence de matière organique dans les eaux usées ne constitue pas, sauf cas très particulier, un obstacle à la réutilisation de ces eaux. Bien au contraire, elle contribue à la fertilité des sols. Cependant, l'expérience montre que le maintien d'une concentration importante en matière organique dans les eaux usées gêne considérablement l'efficacité des traitements destinés à éliminer les germes pathogènes (FAO, 2003). De plus, les concentrations significatives en matière organique peuvent aussi entraîner des odeurs désagréables, notamment s'il arrive que les eaux

stagnent en surface. Enfin, une présence excessive de matières en suspension peut entraîner des difficultés de transport et de distribution des effluents ainsi que l'obturation des systèmes d'irrigation.

2.5.2. Eléments toxiques organiques

Les eaux usées contiennent des composés chimiques toxiques très persistants et qui ont une grande lipophilicité. Parmi ces composés, on peut citer les hydrocarbures polycycliques aromatiques, les alkyl-phénols, chlorophénols, phtalates, les pesticides et les résidus pharmaceutiques actifs. Certains composés ont un pouvoir de perturber le système endocrinien tels que les hydrocarbures polycycliques aromatiques et les alkylphénols (Belgiorno et al., 2007). En effet plusieurs environnements aquatiques ont été pollués par ces composés en plus des autres substances pharmaceutiques dont la principale source est les eaux usées (Kimura et al. 2004). Il s'est avéré que les stations d'épuration sont des sources potentielles de ces produits toxiques (Belgioro et al., 2007; Andreozzi et al., 2003).

Cependant, les faibles concentrations en ces composés dans les eaux usées limitent le risque d'exposition lors de leur réutilisation pour l'irrigation (Toze, 2006). De plus, En raison de la faible solubilité de ces éléments organiques, on les retrouvera concentrés dans les boues plutôt que dans les eaux résiduaires (FAO, 2003).

2.5.3. Salinité Synthèse bibliographique

La salinité d'une eau correspond à sa concentration en sels dissous dans leur ensemble. Elle est exprimée soit par la valeur de la conductivité électrique (CE) ou par le résidu sec (RS).

La CE de l'eau, peut être estimée à partir de la concentration en RS exprimé en g/l, en utilisant à titre indicatif les relations approximatives suivantes :

$RS \text{ (g/l)} = 0,64 \times CE \text{ (dS/m)}$ lorsque

$RS \text{ (g/l)} = 0,80 \times CE \text{ (dS/m)}$ lorsque

$CE < 5 \text{ dS/m}$.

$CE > 5 \text{ dS/m}$.

D'une manière générale, la concentration en sels de l'eau usée excède celle de l'eau du réseau d'alimentation en eau potable (Faby et Brissaud, 1997). Lorsque les eaux usées sont valorisées en irrigation, d'autres paramètres entre en considération notamment le SAR (ratio du Sodium Absorbable) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium échangeables. Généralement, le SAR et la CE de l'eau destinée pour l'irrigation, sont utilisés en combinaison afin d'évaluer le risque potentiel de salinisation des sols (Tableau I.1).

Tableau I.1: Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation (Ayers et Westcot, 1985)

Problèmes potentiels en Degré de restriction Unités
Irrigation Aucun Léger à modéré Sévère Salinité
CE dS/m <0,70,7-3,0>0,30
TDS mg/L <450450-2000>2000
Infiltration
SAR= 0-3 et CE = dS/m >0,70,7-0,2<0,2
= 3-6=>1,21,2-0,3<0,3
= 6-12=>1,91,9-0,5<0,5
= 12-20=>2,92,9-1,3<1,3
= 20-40=>5,05,0-2,9<2,9
Toxicité Spécifique des ions
Sodium (Na)
Irrigation de surface SAR <33-9>9
Irrigation par aspersion méq/L <3>3
Chlorure (Cl)
Irrigation de surface méq/L <44-10>10
Irrigation par aspersion méq/L <3>3
még/L <0,70,7-3,0>3,0 Bore (B)
Effets divers
Azote (NO ₃ -N) méq/L <55-30>30
Bicarbonates (HCO ₃) méq/L <1,51,5-8,5>8,5
pH Gamme normale 6,5 - 8,4
CE: conductivité électrique; TDS: total dissolved solids; SAR: rapport d'absorption du sodium

3. La réutilisation des eaux usées

3.1. Bilan mondial Synthèse bibliographique

Pendant les dernières années, la réutilisation des eaux usées a connu un développement très rapide avec une croissance des volumes d'eaux usées réutilisées de l'ordre de 10 à 29 % par an, en Europe, aux États Unis et en Chine, et jusqu'à 41 % en Australie. Le volume journalier actuel des eaux réutilisées atteint le chiffre impressionnant de 1,5-1,7 millions de m³ par jour dans plusieurs pays, comme par exemple en Californie, en Floride, au Mexique et en Chine (Lazarova et Brissaud, 2007).

La figure I.3 illustre l'ampleur de la valorisation des eaux usées dans différents pays du monde (Jiménez et Asano, 2007).

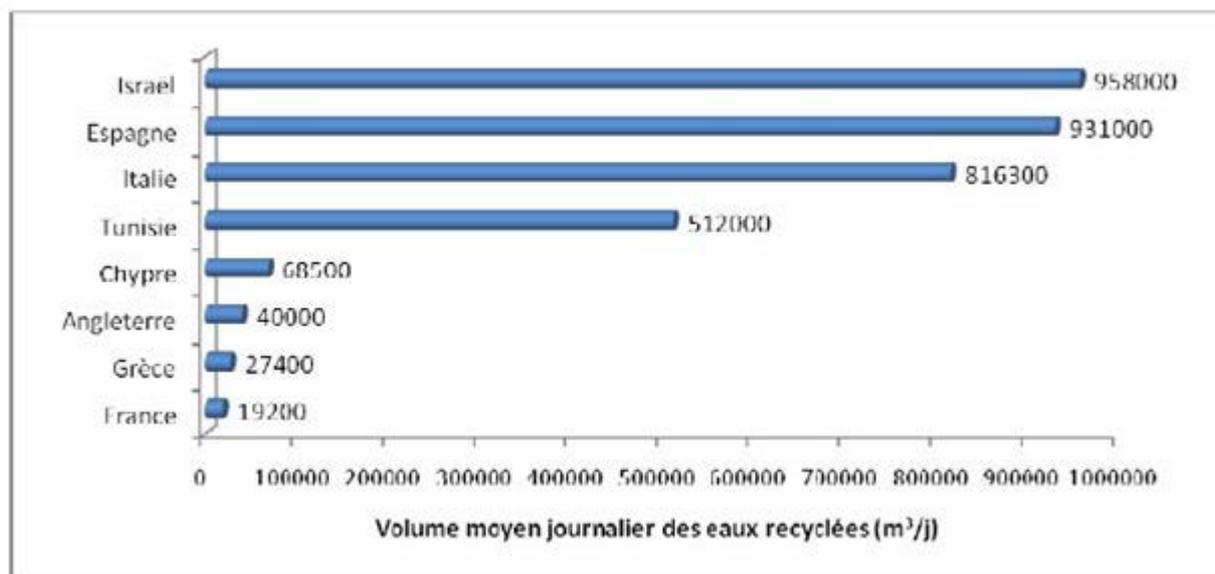


Figure I.3: Volume moyen journalier des eaux usées recyclées en quelques pays de la Méditerranée (données pour les années 2000-2003, adaptées de Jiménez et Asano, 2007).

Il est bien évident, que la réutilisation des eaux usées (rejets bruts ou traités) a connu une promotion à travers le monde entier, sur la base de vraies expériences. En Amérique Latine (Peasey et al. 2000), environ 400 m³/s d'eaux usées brutes s'écoulent dans les eaux de surface et presque 500 000 hectares de terres agricoles sont irrigués avec des eaux usées, essentiellement sans conditionnement (Mexique-350000, Chili-16000, Pérou-5500 et Argentine-3700). Au Mexique, l'irrigation avec les eaux usées a débuté depuis 1926 pour l'irrigation de différents types de cultures. Ainsi, après plus de 80 ans, il existe 40 départements qui réutilisent les eaux usées, dont uniquement 11% sont traitées, pour l'irrigation des terres agricoles avec une surface totale de 350 milles hectares (Peasey et al. 2000). Dans la Vallée d'Amezqital se trouve le plus grand projet de réutilisation des eaux usées au monde avec 83 000 hectares irrigués avec des eaux usées brutes (Domínguez-Mariani et al., 2004).

Aux Etats-Unis, depuis 1955, les eaux usées sont réutilisées à des fins paysagères. En effet, outre l'arrosage de parcs, de parcours de golf et de jardins publics, des lacs artificiels ont été alimentés en tout ou partie par des eaux usées épurées (Puil, 1998). A titre d'exemple, en 1961, le lac Santee en Californie a été mis en eau et alimenté par des eaux épurées et désinfectées. Parmi les exemples de réutilisation agricole des eaux usées traitées (EUT), on peut citer ceux de Bakersfield et Orange en Californie et Manatee County en Floride. A Bakersfield, des effluents ayant en partie subi un traitement poussé sont utilisés pour l'irrigation de coton, de luzerne, de maïs, d'orge et de betteraves à sucre. A Orange (USA), 800 hectares d'espaces verts urbains sont arrosés et 400 hectares de terres

agricoles sont irrigués. Enfin, à Manatee County, des terrains de golf et des parcs et 3000 hectares de cultures agricoles et de pépinières sont irrigués (Puil, 1998).

En France, la réutilisation des eaux épurées est peu développée. Cela est essentiellement dû à l'abondance de ressources en eau dont la consommation ne dépasse pas 24 % des ressources disponibles (Lazarova et Brissaud, 2007). Bien que, dans ce pays, la réutilisation des EUT a débuté depuis les années quatre-vingt, la réutilisation directe d'eaux usées est restée limitée à quelques cas particuliers, notamment dans les îles de Ré, Noirmoutier, Oléron et de Porquerolles. A Noirmoutier, l'irrigation est réalisée sur 220 hectares de pommes de terre et de courgettes. A Ars-en-Ré, l'irrigation par aspersion est effectuée sur des cultures de maïs, de tournesol et de pomme de terre. Les cultures maraîchères et les vergers (pêchers, amandiers) de Porquerolles sont arrosées à la raie ou par irrigation localisée sur une surface d'irrigation de 30 hectares (Puil, 1998). Le projet de Clermont-Ferrand est le cas le plus important de réutilisation des eaux usées épurées en France. En 1996 et 1997, l'irrigation se faisait sur 50 ha (réseau pilote), puis en 1998, le périmètre s'est étendu à 580 ha, sur 8 communes totalisant 17 000 habitants. Pendant la saison d'irrigation (de juin à octobre), les effluents épurés subissent un traitement complémentaire en passant par des lagunes de stabilisation. En 1998, 150 000 m³ d'effluents industriels et 440 000 m³ d'effluents domestiques ont été ainsi utilisés après traitement pour l'agriculture. Les principales cultures sont le maïs, le maïs-semence et la betterave.

D'une manière générale, pratiquement tous les autres pays du pourtour de la Méditerranée, de l'Espagne à la Syrie, réutilisent des eaux usées (traitées et non traitées) pour diverses applications (Bixio et al., 2005). En effet, le bassin méditerranéen est une région où la pénurie en eau est particulièrement ressentie. C'est aussi l'une des régions où la réutilisation agricole des effluents urbains est la plus pratiquée. Dans certains pays, cette réutilisation est devenue l'objet d'une politique nationale comme en Algérie, en Grèce et en Jordanie (Rebhun, 2004, Tsagarakis et al., 2004, Ammary, 2007, Bahri et Brissaud, 2002). En Algérie, les EUT représentent 4,3% des ressources en eau disponibles pour l'année 1996, et elles vont atteindre 11 % à l'horizon 2030. En Israël, ces eaux représentent 15 % des ressources disponibles pour l'année 2000 et environ 20% vers 2010 (Kamizoulis et al., 2003). En revanche, par rapport au total des ressources en eau, les volumes en eaux usées reconditionnées représentent environ, 7% en Algérie, 8% en Jordanie, 24% en Israël et 32% au Kuwait. Cependant, la fraction réutilisée des eaux usées est très variable, avec pour ce dernier pays environ 10% alors que les chiffres sont de 20 -30 % en Algérie, 85 % en Jordanie et 92% en Israël (Kamizoulis et al., 2003).

La Jordanie se rapproche de son objectif de réutilisation de 100% des EU. Environ 90% des 73 millions de mètres cubes d'eau récupérées sur les 19 stations de traitement des eaux usées sont

aujourd'hui réutilisés, directement et indirectement, dans l'industrie, l'aménagement et l'agriculture (sources nouvelles, 2006).

3.2. Traitement et réutilisation des eaux usées en Algérie

3.2.1. Introduction

Lors de la création de l'office national de l'assainissement (ONA), en 1999, la priorité en matière de traitement était d'assurer un traitement biologique aux effluents qui devaient être rejetés dans le milieu naturel. Les volumes traités ont évolué de 12 M (million) m³/an en 1975 à 169 Mm³/an en 2001 sur une capacité d'épuration totale de 218 Mm³/an. En 2008, les volumes traités ont atteint 230 Mm³ (ONAS, 2008).

En 2009, les eaux usées sont traitées dans 100 stations d'épuration. Près de 50% des volumes d'eaux traitées sont produits dans le pôle du Grand Alger. La réutilisation étant encore relativement limitée, près de 80% des eaux traitées sont rejetées en mer. Des émissaires marins ont été par conséquent réalisés afin d'éloigner les effluents des grandes agglomérations et pour la préservation du littoral (Alatiri et al., 2002).

3.2.2. Niveau de traitement Synthèse bibliographique

Les stations d'épuration traitent les eaux usées d'origine domestique (60 %), industrielles (30 %) et touristique (10 %). Le volume d'eau traité de 169 millions m³ /an correspond à 89 millions de kg de DBO₅/an et à 5,5 millions d'équivalents habitants (Benabdallah et Neubert, 2003).

Les procédés proposés incluent :

- le traitement primaire : comprend essentiellement le dégrillage et le dessablage qui peut être aéré ou non.
- le traitement secondaire (traitement biologique) : se fait selon les différents procédés d'épuration (Tableau I.2).
- le traitement tertiaire : Cinq stations d'épuration assurent un traitement tertiaire avec des étapes de déphosphatation et de dénitrification (rejet dans un oued et un barrage). Ces traitements concernent environ 4,8% des eaux usées traitées.

Tableau I.2 : Différents procédés pour le traitement secondaire

Types de procédés	Volume d'effluents traités (%)
Boues activées moyenne charge	46,9
Boues activées à faible charge	31,8
Lagunage	16,2
Lit bactérien	0,7
Lit bactérien et boues activées	4,4

3.2.3. Domaines de réutilisation des eaux usées traitées en Algérie

Les critères technico-économiques ont permis d'installer jusqu'à présent 750 hectares de périmètres irrigués pouvant mobiliser 30% des effluents rejetés (ONAS, 2008). Les volumes consommés varient énormément d'un périmètre à l'autre selon les conditions climatiques (soit de 05 à 12 Mm³/an). Les EUT constituent pour les agriculteurs une source d'eau disponible, cependant, celle-ci ne permet pas de développer les cultures à haute rentabilité économique et présente des risques sanitaires. Les meilleurs niveaux d'utilisation sont rencontrés dans les périmètres arboricoles, dans les régions ayant une tradition de l'irrigation et dans les régions semi-arides (Rejeb et al., 2002). En application du décret du 12/10/1990 qui vise le contrôle de la réutilisation des EUT par les services du ministère de l'agriculture de l'environnement et des ressources hydriques ainsi que par ceux du ministère de la santé publique, plusieurs projets sont programmés à moyen et à long terme pour la réutilisation des EUT (Ben Abdallah, 2003). Autour de la ville d'Alger, un grand projet est en cours d'étude pour la création de 6.000 ha de périmètres irrigués dont la première tranche couvrant 100 ha est programmée pour 2011. A long terme, il est envisagé d'irriguer 22.000 ha par les eaux usées traitées à l'horizon de 2020, soit une augmentation de plus de 300% par rapport à la situation actuelle.

En outre, quelque projets programmer en Algérie comme des terrains de paysagerie, des surfaces et des espaces verts, et des parcs d'attraction dont les superficies dépasse 100000 has à travers le territoire national.

D'autres projets d'espaces verts irrigués sont programmés pour l'autoroute Alger - Tlemcen et pour l'embellissement des différent lac Nord de l'Algérie, totalisant une superficie de 722 ha à l'horizon de 2011 et 1200 à l'horizon de 2021.

3.3. Les différentes réglementations dans le monde

A l'échelle mondiale, il n'existe pas une réglementation commune concernant la réutilisation des eaux usées. Ceci est dû à la diversité du climat, de la géologie et de la géographie, du type de sols et de cultures, mais surtout au contexte économique, politique et social du pays.

Cependant, quelques gouvernements et organismes ont déjà établi des normes de réutilisation tel l'état de Californie, l'OMS, la FAO, etc... La plupart des pays en voie de développement ont formulé leurs normes de réutilisation des eaux usées sur la base des recommandations fixées par l'un des organismes précités.

3.3.1. Les recommandations de l'OMS

Les recommandations de l'OMS (Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture) ou « Recommandations sanitaires pour l'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture » (1989) sont les seules à l'échelle internationale (Tableau I.3).

Elles ne concernent que l'usage agricole et sont ciblées sur des paramètres exclusivement microbiologiques. Elles sont source d'inspiration pour de nombreux pays à travers le monde.

En 2000, elles ont été révisées, en intégrant les résultats de nouvelles études épidémiologiques (Blumenthal et al., 2000). Les modifications ont essentiellement porté sur la norme “ œufs d’helminthes ” qui pour certaines catégories est passée de 1 à 0,1 œuf L⁻¹. Ces recommandations sont destinées à une utilisation internationale et sont donc adaptées aux pays en voie de développement. Elles représentent la limite au-delà de laquelle la santé publique n’est plus assurée.

L’OMS a publié en 2006 de nouvelles lignes directrices sur l’utilisation des eaux usées (WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater), qui tiennent compte des situations locales et privilégient les moyens à prendre pour réduire au minimum les risques sanitaires posés par ces eaux. L’approche innove surtout parce qu’elle encourage l’adoption de mesures relativement simples pour protéger la santé à tous les maillons de la chaîne alimentaire. Il s’agit d’une approche à barrières multiples qui cherche à protéger la santé des consommateurs avant que les aliments irrigués au moyen d’eaux usées n’atteignent leur assiette. Cette approche peut inclure la combinaison des éléments suivants: le traitement des eaux usées, la restriction des cultures, les techniques d’irrigation, le contrôle de l’exposition aux EU ainsi que le lavage, la désinfection et le cuisson des produits (OMS, 2006).

3.3.2. Les recommandations USEPA

L’USEPA (United States Environmental Protection Agency) a publié en 1992, en collaboration avec l’USAID (United States Agency of International Development), ses propres recommandations sur la réutilisation des EUT, intitulées “Guidelines for Water Reuse”. Contrairement à l’OMS, ces recommandations ne sont pas basées sur des études épidémiologiques ni sur une estimation du risque, mais sur un objectif de zéro pathogène dans les eaux réutilisées. Ces normes microbiologiques sont donc beaucoup plus strictes.

Les recommandations de l’USEPA concernent tous les usages envisageables pour des eaux usées épurées (usage urbain, agricole, industriel, recharge de nappe, etc.) ce qui en fait un outil puissant. Précisons que chaque état américain peut lui-même fixer ses propres recommandations, en s’inspirant plus ou moins de celles de l’USEPA. Ainsi, les normes californiennes “Title 22” sont extrêmement sévères, et ont inspiré de nombreuses réglementations dans le monde. Dans les recommandations de l’USEPA plusieurs paramètres sont pris en compte : le pH, la Demande Biologique en Oxygène (DBO5), la turbidité ou les solides en suspension et les coliformes fécaux.

Les deux recommandations (OMS et USEPA) s’opposent à plusieurs points de vue. Une des différences concerne le niveau de traitement recommandé. Il est dit dans le document de l’OMS qu’un traitement extrêmement efficace peut être atteint par des bassins de stabilisation, alors que l’USEPA n’évoque que des traitements de désinfection tertiaire type chloration, ozonation, etc. Les modes de contrôle varient aussi : alors que l’OMS préconise de contrôler le nombre de nématodes, l’USEPA recommande le comptage des coliformes totaux comme unique contrôle de la qualité

microbiologique. En général, l'OMS est taxée d'être trop laxiste, et l'USEPA de préconiser des traitements trop chers et trop technologiques, inaccessibles aux pays en voie de développement.

Tableau I.3: Recommandations microbiologiques révisées de l'OMS (2000) pour la réutilisation en agriculture des eaux usées

Catégories	Conditions de réutilisation	Groupes exposés	Techniques d'irrigation	Nématodes intestinaux ^b	Coliformes fécaux/100mL	Traitements recommandés pour atteindre le niveau de qualité microbiologique
A	Irrigation sans restrictions A1 pour les cultures maraîchères consommées crues, les terrains de sports, les parcs publics ^d	Travailleurs, consommateurs, public	Toutes	≤ 1	≤ 10	Série de bassins de stabilisation, réservoir de stockage et de traitement ou traitement équivalent permettant d'atteindre la qualité microbiologique escomptée
B	Irrigation restreinte. Céréales, cultures industrielles, fourragères, pâturage et forêt ^c	Travailleurs Population résidant dans l'environnement proche	Par aspersion Par rigole d'infiltration ou par gravité Toutes	≤ 1 ≤ 1 ≤ 0.1 ^e	$\leq 10^5$ $\leq 10^3$	Série de bassins de rétention avec un temps de séjour suffisant (8 à 10 jours) ou traitement équivalent permettant l'abattement des œufs d'helminthes et des coliformes
C	Irrigation localisée sur des cultures (f) de la catégorie B s'il n'y a pas d'exposition des travailleurs ou du public	Aucun	Goutte-à-goutte, micro-jet, etc.	Non applicable	Non applicable	Pré-traitement nécessaire pour des raisons techniques liées à l'irrigation, mais pas moins qu'une sédimentation primaire

a : Dans certains cas, tenant compte du contexte épidémiologique, socioculturel et environnemental, ces limites sont changées en conséquence ;

b : Les espèces de *Ascaris* et *Trichuris*;

c : Durant la période d'irrigation

d : Des limites plus restrictives de moins de 200 coliformes fécaux /100 mL sont plus appropriées pour les Golfs, les hôtels et des espaces où le public peut avoir un contact direct avec les espaces irrigués.

e : Cette limite peut être augmentée à ≤ 1 œuf/l si (i) il fait chaud et sec et que l'irrigation de surface n'est pas pratiquée ou (ii) le traitement de l'eau contient aussi des traitements chimiothérapeutiques anti-helminthes.

f : Dans le cas des arbres fruitiers, l'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la récolte, et aucun fruit ne doit être récolté au sol. L'irrigation par aspersion ne doit pas être utilisée.

3.3.3. Les recommandations de l'Union Européenne

L'Union Européenne accuse un retard en termes de législation sur la réutilisation des eaux usées épurées, puisqu'elle se limite à cette phrase de l'article 12 de la directive CEE numéro 91/271 de 1991 sur les eaux usées, qui établit que "des eaux usées traitées devront être réutilisées quand ce sera approprié" (Bontoux, 1997). Cette lacune n'a pas empêché les pays membres d'adopter leur propre réglementation, sans homogénéisation à l'échelle européenne. En effet, aujourd'hui, certains pays comme l'Italie s'inspirent des normes américaines, et d'autres, comme la France, des normes de l'OMS.

Les pays d'Europe qui ont une réglementation sont l'Italie, l'Espagne et la France (Junger, 2000). Certains pays tels que l'Espagne, Chypres ou l'Italie (Andreadakis et al., 2003) ont tendance à adopter des normes plus strictes que celle de l'OMS. L'Italie est le premier à avoir adopté une réglementation en 1977 qui suit dans les grandes lignes l'approche californienne.

Cependant, en Sicile, une réglementation régionale, plus proche de celle de l'OMS, a été mise en place (Andreadakis et al., 2003).

Le tableau I.4 montre les normes bactériologiques adoptées dans certains pays et organismes. Les conditions climatiques et géographiques, le niveau de développement et les moyens financiers sont les principaux facteurs influençant le choix des normes de réutilisation. Ainsi, des pays comme la Algérie et l'Afrique de sud ont opté pour les recommandations de l'OMS qui sont destinées essentiellement aux pays en développement. Alors que des pays développés tel que le Japon et Israël et d'autres pays riches comme le Koweït et l'Arabie Saoudite, ont choisi des normes plus sévères, généralement inspirées de celles de la Californie (Title 22).

Par contre, les normes établies dans certains pays développés comme la France, sont basées sur les recommandations de l'OMS.

D'autres organismes ont établi des recommandations complémentaires pour quelques paramètres chimiques. Ainsi, la FAO (2003) a fixé, selon la durée de réutilisation, des limites concernant les éléments traces dans les eaux usées traitées destinées à l'irrigation (Tableau I.5).

Tableau I.4: Normes bactériologiques appliquées dans certains pays et préconisées par des organisations (Lavison et Moulin, 2007)

Pays/Organisation	Recommandations
OMS (niveau A)	1000 coliformes thermotolérants/100mL + 1 œuf d'helminthe/L
USEPA	< 1 ou 200 coliformes thermotolérants/100mL selon culture
Title 22 (Californie)	2,2 ou 2,3 coliformes totaux/100mL selon cultures + filière de traitement agréée
France (CSHPF, niveau A)	1000 coliformes thermotolérants/100mL + 1 œuf d'helminthe/L + contrainte techniques particulières
Afrique de Sud	1 ou 1000 coliformes thermotolérants/100mL selon culture + filière imposés
Japon	1 E. coli/100mL + résiduel de chlore total > 0,4 mg/L
Koweït	100 ou 10000 coliformes totaux/100mL selon culture + effluent oxydé + filtré et désinfecté
Israël	2,2 ou 500 coliformes thermotolérants/100mL selon culture
Arabie Saoudite	2,2 coliformes totaux/100mL (culture à accès restreint)
Algérie	< 1 nématode intestinal/L