

Réutilisation des eaux usées et des excréta

Catherinot Julie

juliecatherinot@gmail.com

Décembre 2013

AgroParisTech Centre de Montpellier
648 rue Jean-François Breton- BP 44494
34093 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél. : (33) 4 67 04 71 00
Fax. : (33) 4 67 04 71 01
www.agroparistech.fr

pS-eau
32 rue Le Peletier
75009 Paris - France
Tél. : (33) 1 53 34 91 20
Fax. : (33) 1 53 34 91 21
pseau@pseau.org

Sommaire

ABSTRACT	3
RESUME	3
INTRODUCTION	4
LES EAUX USEES ET LES EXCRETAS D'ORIGINE DOMESTIQUE	5
DIVERSITÉ ET ORIGINE DES EFFLUENTS DE L'ASSAINISSEMENT DOMESTIQUE	5
LES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS D'ASSAINISSEMENT ET LEURS SOUS-PRODUITS	6
TRAITEMENT DES EAUX GRISES MELANGÉES AUX EAUX NOIRES	6
TRAITEMENT DES EAUX NOIRES, BOUES DE VIDANGE, BOUES D'ÉPURATIONS ET FECES	7
TRAITEMENT DES EAUX GRISES	8
TRAITEMENT DES URINES	9
L'ENJEU DE LA VALORISATION DES PRODUITS DE L'ASSAINISSEMENT DOMESTIQUE	10
SITUATION GLOBALE DE L'ASSAINISSEMENT	10
EAUX USÉES ET EXCRÉTAS, UNE RESSOURCE POTENTIELLE	11
LES PRATIQUES DE VALORISATION DES EAUX USEES ET DES EXCRETAS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT	12
OÙ PRATIQUE-T-ON LA VALORISATION ?	12
LES CAS RÉFÉRENCÉS ET ÉTUDIÉS	13
NATURE EXACTE DES VALORISATIONS	13
CAS N°1 : KORBA, TUNISIE	13
CAS N°2 : DAKAR, SENEGAL	14
CAS N°3 : CUTTACK, KOKALTA (CALCUTTA), INDE	15
CAS N°4 : CHENNAI, INDE	15
CAS N°5 : MEZQUITAL VALLEY, MEXICO	15
ANALYSE DES PRATIQUES DES PAYS EN DEVELOPPEMENT	16
LES FACTEURS DÉTERMINANTS DANS LE CHOIX DES PROCESS DE VALORISATION	16
L'ACCEPTABILITÉ DE L'UTILISATION DES PRODUITS DE VALORISATION	16
LA PRISE EN COMPTE DES ENJEUX ÉCONOMIQUES	17
ASPECTS SANITAIRES	17
ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX	17
ASPECTS SOCIAUX (CRÉATION D'EMPLOIS, ETC.)	18
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	19
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	20
ANNEXE « LISTING DES CAS REFERENCES »	23

ABSTRACT

This study is an overview of wastewater and excreta reuse and aims to analyze the socio-economic and institutional drivers and obstacles encountered by these projects in the developing countries. Water scarcity and demographic growth, implying an increase in food and water demand, are the main drivers of wastewater and excreta reuse projects. In developing countries, poor sanitation is often encountered and the result of unplanned reuse is responsible for serious sanitary and environmental problems. When implemented and controlled, the reuse can generate significant socio-economic and environmental benefits. Water and excreta reuse projects in developing countries are the occurring in response to a lack of sanitation and to agriculture and aquaculture needs.

RESUME

Cette étude recense des projets de réutilisation d'eaux usées et d'excrétas dans les pays en développement et, a pour objectif d'analyser les moteurs et freins socio-économiques et institutionnels rencontrés dans leur élaboration. Le manque d'eau, la croissance démographique ont pour conséquence une augmentation de la demande en nourriture et en eau. Ce sont les moteurs principaux des projets de réutilisation des eaux usées et des excréta. Dans les pays en développement, l'assainissement fréquemment déficient est à l'origine de réutilisations spontanées d'eaux usées non sans conséquences sanitaires et environnementales. La réutilisation d'eaux usées et d'excrétas lorsqu'elle est encadrée et contrôlée est génératrice de bénéfices socio-économiques et environnementaux. Les projets de réutilisation d'eaux usées et d'excrétas permettent de pallier à la fois à un manque d'assainissement et de répondre aux besoins de l'agriculture et de la pisciculture.

INTRODUCTION

La réutilisation des eaux usées et des excréta (REU) se pratique mondialement depuis des millénaires. Consistant à réutiliser des eaux usées et des excréta (EU) ayant subi des traitements à des niveaux plus ou moins avancés, elle présente, lorsqu'elle est maîtrisée, de nombreux avantages socio-économiques, sanitaires et environnementaux. Dans les pays en développement (PED) la forte pression démographique a pour corollaire une demande alimentaire et une pression sur la ressource en eau douce croissantes. La valorisation des EU en agriculture et en aquaculture apparaît comme une solution particulièrement intéressante pour répondre à ces problématiques. Dans les zones arides et semi-arides, où le manque d'eau est particulièrement pressant, la gestion des EU en tant que ressource peut être une véritable opportunité. Si la REU dans les PED est principalement de nature agricole ou aquacole, elle ne l'est pas exclusivement comme en témoignent certains projets.

La mise en place d'un projet de réutilisation des eaux usées traitées (REUT) prend nécessairement en compte la question de l'assainissement des EU. Dans les PED la forte croissance démographique urbaine a pour conséquence la production croissante de volumes d'EU, qui bien souvent ne peuvent être traités par les systèmes d'assainissement en place. Cette défaillance donne lieu à des REU spontanées présentant d'importants risques sanitaires et environnementaux. Dans ce contexte, les projets de REUT deviennent multi-objectifs puisque palliant à la fois à un assainissement défaillant et répondant à un ou plusieurs besoins en matière de valorisation. A la différence des pays européens, les réseaux de tout à l'égout ne sont pas le type de réseau d'assainissement le plus couramment rencontrés dans PED, ce qui ouvre un éventail de possibilités techniques alternatives et peu coûteuses en matière d'assainissement.

Cette synthèse a pour objectif de recenser les différents types de valorisation des EU dans les PED ainsi que d'analyser les enjeux et les freins de ces pratiques en termes socio-économiques, environnementaux et sanitaires. Dans un premier temps sont différenciés les types d'EU et les traitements associés en vue d'une éventuelle REUT.

LES EAUX USEES ET LES EXCRETAS D'ORIGINE DOMESTIQUE

DIVERSITE ET ORIGINE DES EFFLUENTS DE L'ASSAINISSEMENT DOMESTIQUE

Il existe six catégories d'effluents d'origine domestique:

- les eaux noires : composées d'urine, d'excrétas et d'eau de chasse. Ces eaux sont chargées en matières organiques azotées et phosphorées, en pathogènes fécaux ainsi qu'en micropolluants.
- les eaux grises : résultant de l'utilisation de l'eau pour la vaisselle, le lavage du linge et les douches. Ces eaux sont chargées en détergents, graisses, solvants, débris organiques et micropolluants. Contenant 20 fois moins de matières organiques, leur charge polluante est moindre que celles des eaux noires.
- les boues de vidange : provenant de la vidange des fosses septiques ou latrines composées d'eaux grises et d'eaux noires.
- excrétas : composées de fèces et d'urine.
- les urines
- les fèces

Selon leur système de collecte, les eaux usées domestiques se composent d'une ou plusieurs catégories de ces effluents. Les réseaux conventionnels de tout à l'égout les plus fréquemment rencontrés en France, mélangent eaux grises et noires. Seules les habitations isolées disposent d'installations d'assainissement sur site, non reliées à un réseau d'égout. Ces systèmes d'assainissement individuels séparent parfois eaux grises et eaux noires. Dans les PED, les eaux grises et les eaux noires sont le plus fréquemment séparées. Le Tableau 1 ci-dessous, présente les catégories d'effluents selon le système de collecte d'assainissement existant.

Filière d'assainissement	Système de collecte	Types d'effluents
Collectif ou semi-collectif	Tout à l'égout	-Mélange d'eaux grises et d'eaux noires
Semi-collectif	Mini -égout	-Eaux grises + eaux noires OU eaux grises
Non-collectif	latrines ou fosses septiques	-Boues de vidange composées d'excrétas
Non-collectif	Toilettes sèches, et latrines à déviation d'urine	-Fèces -Urine

Tableau 1. Les 6 effluents d'origine domestique

Traitement des eaux grises mélangées aux eaux noires

En assainissement collectif, les eaux usées grises et noires mélangées sont acheminées par des réseaux de collecte ou égouts à des stations d'épurations où elles vont subir différents traitements. La chaîne de traitement type consiste en la succession de prétraitements, traitements primaires et secondaires avant le renvoi de l'effluent traité au milieu naturel. Dans le cas où les effluents sont rejetés dans des zones sensibles ou sont destinés à une réutilisation, cet assainissement type sera complété par un traitement tertiaire et une désinfection. Les traitements tertiaires et la désinfection sont à mettre en place conformément aux critères de qualité exigés ou visés. Si ces effluents font l'objet d'une réutilisation, le choix de ces techniques doit être considéré en fonction de l'usage envisagé. Les critères de qualité et d'abattement de la pollution en vue d'une réutilisation doivent au minimum atteindre ceux mentionnés par les directives de l'OMS en cas d'absence de législation. Certains pays disposent de législations propres, nécessairement plus exigeantes que celles de l'OMS.

Dans la Figure 1, sont présentées trois chaînes de traitements possibles pour des eaux usées contenant des eaux noires mélangées à des eaux grises, en lien avec un type de réutilisation. Sont mentionnés également les sous-produits d'épuration qui devront également subir des traitements avant d'être relâchés au milieu naturel ou réutilisés. Les traitements présentés ici ne sont pas exhaustifs.

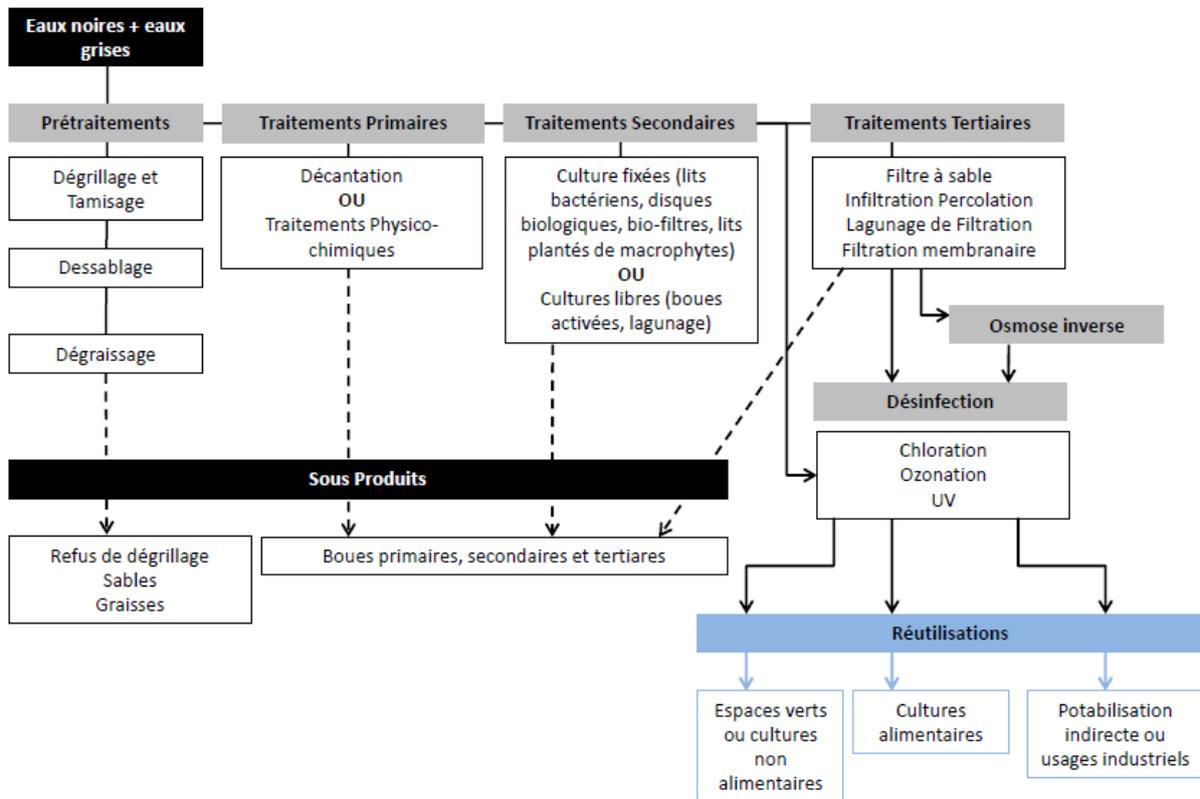


Figure 1. Chaînes de traitement des eaux usées et sous-produits associés pour différentes réutilisations

A leur arrivée en station d'épuration (STEP), les effluents sont prétraités de façon à éliminer les gros déchets, dessabler et déshuiler les eaux usées. Ces effluents prétraités subissent

ensuite un traitement primaire dont l'objectif est d'éliminer les matières minérales et organiques en suspension. A noter que la décantation primaire est un processus peu coûteux, contrairement aux traitements physico-chimiques. Les effluents issus du traitement primaire entrent ensuite dans une chaîne de traitement secondaire visant à diminuer la pollution dissoute. A la suite du traitement secondaire, les effluents peuvent être directement désinfectés. Néanmoins, ils ne doivent pas être trop chargés en matières en suspension pour que cette désinfection soit efficace. Pour les traitements UV en particulier, le taux de matière en suspension doit être inférieur à 5 mg/L. Sinon, ils sont conduits à une chaîne de traitement tertiaire, consistant à abaisser le taux de matières phosphorées ou azotées. Le traitement peut se poursuivre ensuite par une osmose inverse et une désinfection dans le cas d'une réutilisation requérant une excellente qualité de l'eau, ou bien simplement une désinfection dans le cas d'une réutilisation pour des cultures alimentaires.

Plus la chaîne de traitement sera poussée, plus la quantité de boues d'épurations produites sera importante et l'assainissement coûteux. Le traitement de ces boues d'épuration est abordé au chapitre suivant.

Traitement des eaux noires, boues de vidange, boues d'épurations et fèces

Dans des systèmes d'assainissement non collectif à séparation d'urine, les fèces sont collectées dans des cuves. Leur assainissement peut être effectué sur site ou bien dans une STEP équipée de systèmes de traitement adaptés. Leur contenu est particulièrement intéressant pour une valorisation agricole et elles sont utilisées depuis longtemps comme fertilisant. Le stockage est la forme la plus simple de traitement sur site des fèces mais ce processus est lent. Il faut de plusieurs mois jusqu'à plusieurs années pour inactiver les pathogènes qu'elles contiennent et obtenir un fertilisant inoffensif. Des bactéries pathogènes peuvent à nouveau se développer si de l'eau vient à s'infiltrer dans la cuve de stockage, ou si les matières sont mélangées à un sol humide (Austin et Van Vuuren, 2001). Cette pratique à température et pH ambiants n'est donc pas complètement sûre mais présente un réel intérêt en contexte climatique chaud et sec.

Plusieurs processus de traitements, présentés en Figure 2, sont envisageables et communs que les effluents à traiter soient des eaux noires, des boues de vidange ou des boues d'épuration. Ces trois types d'effluents seront désignés sous le terme générique « boues » dans la suite de cette partie. Les boues les plus liquides vont subir un épaissement et une déshydratation ayant pour objectif d'augmenter leur siccité, c'est-à-dire de les concentrer et de les amener à une forme pâteuse ou solide. Plusieurs solutions techniques existent pour réaliser ce processus, la plus intéressante en termes de réutilisation agricole est l'adjonction de chaux permettant à la fois d'hygiéniser et d'augmenter la quantité de nutriments des boues. Les produits obtenus peuvent ensuite subir un autre traitement.

Les processus de séchage permettent de déshydrater les boues de façon plus performante que l'épaissement et la déshydratation et de diminuer leur volume. Les boues sont presque totalement hygiénisées et leur contenu en phosphore et azote préservé. Il est à noter que les séchages thermiques et sous serre sont coûteux à mettre en œuvre. Le séchage naturel nécessite quant à lui de grandes surfaces et présente des nuisances olfactives.

Un autre traitement possible est la digestion des effluents par dégradation biologique de leurs matières organiques, permettant de réduire le volume des boues de 30 à 40%. Ce

procédé produit des boues partiellement hygiénisées devant faire l'objet d'un autre traitement. Des biogaz sont également produits pouvant faire l'objet d'une valorisation. Ce processus est coûteux en termes d'investissement et d'exploitation.

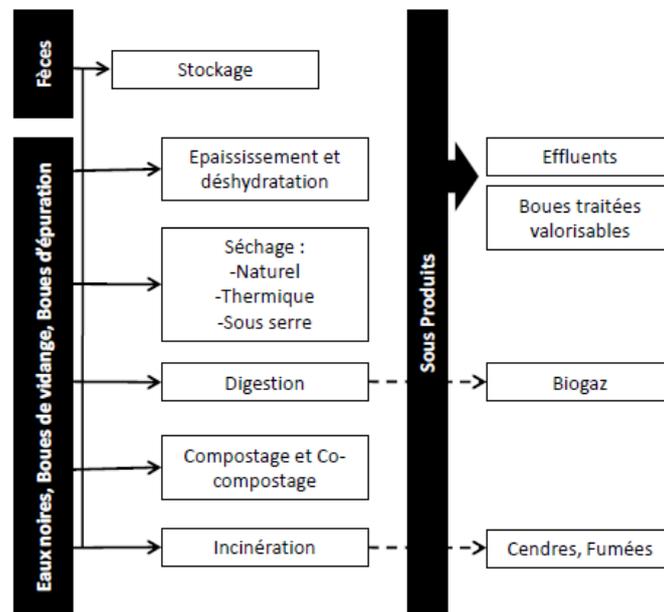


Figure 2. Traitements et sous-produits associés des fèces, eaux noires, boues d'épuration et de vidange

Une alternative peu coûteuse au traitement des boues est le compostage consistant en une décomposition aérobie de la matière organique par des micro-organismes. Les changements de pH et la haute activité biologique qui s'opèrent dans ce milieu contrôlé permettent d'inactiver les pathogènes. Il est d'usage d'ajouter un coproduit (déchets verts par exemple) et de réaliser un co-compostage pour une meilleure efficacité. Le produit de compostage est hygiénisé et présente une valeur agronomique intéressante bien que moindre de celles des sous-produits d'épaississement de déshydratation.

Le procédé de traitement le plus sûr est sans doute l'incinération qui produira un fertilisant sous forme de cendres totalement exemptes de pathogènes. Néanmoins, au cours du processus l'azote est perdu et le procédé est particulièrement coûteux.

Tous les procédés de traitements des boues, excepté l'incinération, produisent des effluents liquides hautement chargés en pollution qui devront être traités selon l'une des chaînes décrites en Figure 1.

Traitement des eaux grises

Les eaux grises constituent le plus gros volume des eaux usées. Leur taux de pollution est faible en comparaison des fèces, eaux noires, excréta et boues de vidange. Elles sont collectées par des réseaux semi-collectifs. Dans des pays développés, comme en Suède ou en Allemagne, les eaux grises à l'échelle d'éco-quartiers sont acheminées vers de petites stations de traitement où elles subissent un traitement primaire tel qu'une décantation, puis un traitement secondaire tel qu'une culture fixée sur lits de roseaux. Ces traitements suffisent pour abattre leur charge polluante et permettre leur retour au milieu naturel. Elles peuvent également être utilisées comme eau de chasse ou servir pour l'arrosage réglementé

de jardins. Dans les PED, ces eaux sont fréquemment déversées dans des tranchées où elles décantent au soleil. Le risque sanitaire associé à leur réutilisation directe est faible. Cependant, ces eaux contiennent des graisses nécessitant un curage afin d'éviter le colmatage des réseaux par lesquels elles transitent. Elles contiennent également des polluants provenant de l'utilisation de détergents, lessives et produits cosmétiques dont l'impact environnemental est à ce jour mal connu.

Traitement des urines

Dans les systèmes d'assainissement à séparation d'urine, celle-ci est collectée dans des cuves. Ce type de système est particulièrement intéressant car les urines, nécessitent peu de traitements. En effet, il a été montré par (Schönning et al., 2004; Höglund, 2001), que le pH élevé et la température sont les facteurs permettant d'inactiver les microorganismes pathogènes contenus dans les urines. Un stockage à température ambiante d'un mois à 20°C, voire de quelques semaines pour des pays connaissant des températures élevées, suffit pour les assainir. Leur contenu en azote, phosphore et potassium les rendent particulièrement intéressantes pour un usage agricole. Une alternative à ce procédé est le séchage des urines dans des tranchées découvertes comme il l'a été expérimenté au Mali et Suède (Schönning et al., 2004). Au cours de ce procédé, leur contenu perd en azote mais le phosphore et le potassium sont retenus.

L'ENJEU DE LA VALORISATION DES PRODUITS DE L'ASSAINISSEMENT DOMESTIQUE

SITUATION GLOBALE DE L'ASSAINISSEMENT

Le traitement des déchets humains ou son manque de traitement pose d'importants problèmes sanitaires notamment dans les PED. Un assainissement basique est une nécessité pour des conditions de santé et de dignité acceptables. Néanmoins, près de 41% de la population mondiale, soit 2,6 milliards de personnes, vivent aujourd'hui sans accès à un système d'assainissement.

Cette portion de la population mondiale se concentre principalement dans les PED d'Afrique Sub-saharienne, de certaines parties de l'Asie, d'Amérique du Sud et d'Amérique Centrale. Selon l'OMS et l'Unicef, ce chiffre sera réduit à 2,4 milliards de personnes d'ici 2015 grâce aux efforts réalisés dans le cadre du septième objectif du millénaire pour le développement (OMD). Ce dernier consiste à diminuer de moitié la population n'ayant pas accès à un système d'assainissement entre les années 1990 et 2015. A ce jour, il est estimé qu'il sera manqué de 8%, soit de un demi-milliard de personnes. Le budget nécessaire pour fournir un assainissement basique à ces populations représente 1% des dépenses militaires mondiales réalisées en 2005, et est équivalent à 1/3 des dépenses mondiales consacrées à l'achat de d'eau en bouteille ou à l'achat de glace par les européens en une année (LeBlanc et al., 2009). Les efforts réalisés dans le cadre de l'OMD se concentrent sur l'accès des ménages à un système d'assainissement mais la question du traitement des EU n'est pas considérée. Dans les PED, les progrès affichés sont insatisfaisants et masquent bien souvent l'absence de traitement des EU.

En Europe de l'Est, Turquie, Russie, Mexique, une partie de l'Amérique du Sud et d'autres régions les traitements sont avancés mais la gestion des boues d'épurations et des déchets générés commence seulement maintenant à être considérée. En Europe, Amérique du Nord, Australie, Nouvelle-Zélande, l'assainissement est performant et un focus est réalisé sur le management des sous-produits d'épuration. Ces régions disposent également de compétences techniques et de moyens matériels leur permettant d'envisager et de mettre en œuvre des solutions.

Selon le WRI (World Research Institute), les populations des PED ont une croissance de 3,5% par an alors que dans les pays développés cette hausse est de 1%. 95% de cette croissance sera absorbée par les villes des PED n'ayant à ce jour pas ou peu de système d'assainissement. Selon, « UN-Habitat », leur population urbaine atteindra 2 milliards d'ici 2030. Les besoins en eau potable seront donc croissants et les ressources en eau deviendront limitées. Les pays développés connaîtront également une pression croissante sur leurs ressources en eau, en raison d'un accroissement de la longévité de leur population mais également de la pollution chimique de leurs ressources. La production d'EU, inévitable conséquence de l'utilisation d'eau potable, verra ses volumes inéluctablement augmenter.

A la pression démographique s'ajoute la pression climatique, se traduisant par une augmentation des occurrences de catastrophes naturelles et de sécheresses induites par une modification globale du climat. Ces facteurs combinés rendront l'accès à l'eau de plus en plus problématique dans certaines régions du monde et seront une source potentielle de conflit. On estime que d'ici 50 ans 40% de la population mondiale vivra dans des régions confrontées à des tensions sur l'eau (World Health Organization, 2006). Dans ce contexte,

l'assainissement et la gestion des déchets qu'il génère sont des questions globales avec des enjeux croissants, nécessitant une prise de conscience de la part de tous les décisionnaires et du public.

EAUX USEES ET EXCRETAS, UNE RESSOURCE POTENTIELLE

Les eaux noires, les boues de vidange, les excréta, l'urine et les fèces contiennent des molécules provenant de la nourriture et des processus de dégradation physiologique. Ces molécules renferment des nutriments : azote (N), phosphore (P), potassium (K) ainsi que des micronutriments : cuivre, fer, nickel et zinc intervenant dans la croissance des plantes. Leur valeur est depuis longtemps reconnue dans le monde agricole. Les eaux grises, contiennent moins de nutriments mais peuvent constituer une ressource en eau disponible tout au long de l'année, ce qui les rend particulièrement intéressantes dans les zones arides et semi-arides. Le Tableau 2 donne la composition moyenne en nutriments des eaux usées domestiques et excréta.

Composant	Eaux grises	Urine	Fèces	Excrétas (Urine + Fèces)
Masse (kg/pers/an)	40000	550	40	590
Masse sèche (kg/pers/an)	29.2	21.9	18	40
N (g/pers/an)	460	4015	548	4563
P (g/pers/an)	110	365	183	548
K (g/pers/an)	1000	1100	400	1500

Tableau 2. Composition en nutriments des eaux usées domestiques et excréta en Suède (Vinneras, 2002)

Outre des éléments valorisables, les eaux grises contiennent des graisses, solvants, détergents et micropolluants dont les nuisances ont été décrites dans le chapitre précédent. Les eaux noires, boues de vidange, excréta, urine et fèces contiennent des agents pathogènes. Les eaux grises en contiennent également mais dans une moindre proportion. Les aspects sanitaires associés aux eaux usées domestiques et excréta sont largement décrits dans les directives de l'OMS et ne seront pas abordés dans le cadre de cette synthèse.

Il est difficile d'avoir une caractérisation précise des eaux usées domestiques. Les régimes alimentaires varient d'une région à l'autre du globe et la part des usages domestiques est plus ou moins importante selon les régions considérées. Jönsson et al. (2005) ont néanmoins établi un modèle permettant d'obtenir en fonction d'un régime alimentaire précis la composition des excréta, urine et fèces résultants. Ce modèle peut présenter un intérêt dans le cadre de l'établissement d'un projet de REUT désireux de connaître la valeur nutritive des effluents. La composition des eaux grises et des produits épuratoires est un thème de recherche actuel dans les pays développés, notamment en ce qui concerne la caractérisation des micropolluants. Une abondante source d'information existe à ce sujet dans littérature scientifique.

Les EU de par l'eau et les nutriments qu'elles contiennent sont une ressource précieuse. Leur utilisation en aquaculture et en agriculture permet de recycler les nutriments et de réduire l'usage de fertilisants. Le stock mondial de phosphore nécessaire à la fabrication des engrais est voué à disparaître à la fin de ce siècle. L'utilisation des excréta à elle seule permettrait de répondre à 22% de la demande mondiale en phosphore. Dans les PED, qui

consomment 63% de la quantité mondiale d'engrais, elle s'avère particulièrement intéressante (World Health Organization, 2006).

LES PRATIQUES DE VALORISATION DES EAUX USEES ET DES EXCRETAS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

OU PRATIQUE-T-ON LA VALORISATION ?

La valorisation des EU est une pratique très ancienne et répandue mondialement. En Chine et en Europe, avant l'introduction des stations d'épuration, les EU étaient fréquemment répandus sur les terres agricoles, leur contenu en éléments fertilisants étant déjà reconnu. Les plus anciennes réutilisations sont attribuées aux pays asiatiques, où, depuis des millénaires, les EU sont utilisés en aquaculture. Dans les pays développés, on a assisté à un recul de ces pratiques en même temps que l'assainissement progressait. Ce n'est que depuis peu que la réutilisation des EU a été remise au goût du jour en s'inscrivant dans une démarche environnementale. Dans les PED, il est nécessaire de différencier les pratiques encadrées de réutilisation, s'inscrivant dans une démarche sanitaire et environnementale contrôlée, des pratiques spontanées et non encadrées résultant d'un assainissement manquant ou défaillant.

Dans les pays industrialisés, on estime que 70% de l'eau douce est destinée à l'irrigation agricole, 8 % aux usages domestiques et 20% aux usages industriels (Drechsel, 2010). Il n'est alors pas étonnant que les réutilisations d'EU soient essentiellement, mais pas uniquement, de nature agricole. Dans les PED, les pratiques de réutilisation sont difficiles à quantifier, soit parce que les volumes d'eaux utilisés ne sont tout simplement pas estimés, ou soit parce les informations sont dissimulées en raison de pratiques illégales ou bien pour des raisons d'acceptabilité de la part des populations. Néanmoins, malgré ce manque d'information 4 à 6 millions d'hectares seraient irrigués avec des EU (traitées et non traitées) selon l'UNHSP (LeBlanc et al., 2009), soit 1,5% des terres cultivées mondialement selon la FAO (Food and Agriculture Organization). Des études ont permis de quantifier la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) pour l'irrigation agricole, voir Figure 3.

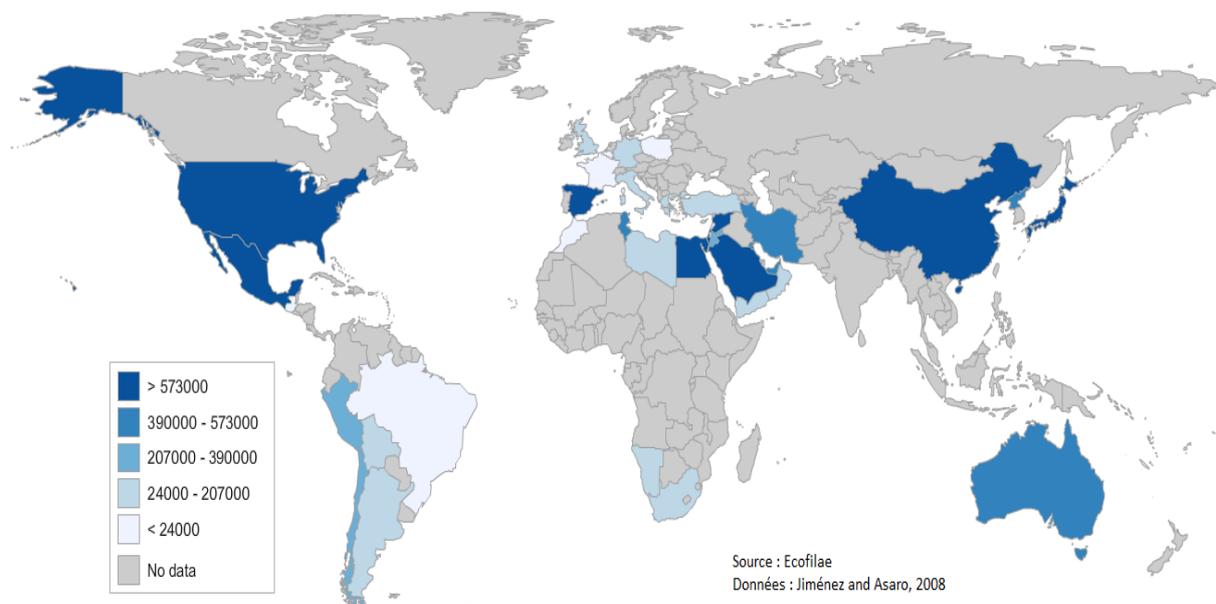


Figure 3. Réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation (en m³/jour). (Condom, 2012)

LES CAS REFERENCES ET ETUDIES

Par compilation d'informations bibliographiques, 44 cas de réutilisation d'EU traités ont été recensés dans des PED et pays émergents du Maghreb, du Moyen Orient, d'Afrique Subsaharienne, d'Amérique du Sud et d'Asie (cf. Annexe « Listing des cas référencés »). La nature des différentes valorisations rencontrées dans ces pays est présentée dans le Tableau 3 ci-dessous.

Nature de la valorisation	Nombre de cas recensés
Agricole	28
- Irrigation de cultures céréalières	
- Maraichage	
- Irrigation de pâturages	
- Irrigation de plantations à valeur industrielle (ex : caoutchouc)	
Piscicole	6
Industrielle	8
- Lessivage des phosphates	
- Raffinerie	
- Usine d'engrais	
Environnementale	5
- Irrigation de forêts	
- Recharge de nappe	
- Lutte contre le biseau salé	
- Soutien d'étiage	
- Lutte contre l'eutrophisation	
Urbaine	5
- Arrosage d'espace verts ou jardins ou golfs	
- Nettoyage	

Tableau 3. Nature des valorisations de la réutilisation des eaux usées et excréta

Un même projet peut être associé à plusieurs types de réutilisations ce qui explique que le nombre total de cas recensés par type de valorisation est supérieur au nombre de cas étudiés. De ce recensement (non-exhaustif) de projets de REUT ressort la tendance annoncée : la prédominance des réutilisations à des fins agricoles.

NATURE EXACTE DES VALORISATIONS

Parmi les différents cas recensés cinq ont été sélectionnés pour faire l'objet d'une analyse plus détaillée. Le choix de ces cas s'est basé sur leur représentativité parmi la nature des valorisations identifiées au Tableau 3. Les informations quantitatives sur ces projets ne sont pas toujours explicites ni précises en raison d'un manque d'informations bibliographiques à ce sujet.

Cas n°1 : Korba, Tunisie

Ce projet initié en 2008 s'appuie sur les acquis d'un projet mené à Nabeul (Tunisie). Il consiste à utiliser les EU (eaux noires + eaux grises) de la ville de Korba pour recharger l'aquifère avoisinant la STEP via un bassin d'infiltration (Agence Française de Développement et BRL Ingénierie, 2011). En Tunisie, 80% de la consommation d'eau douce est utilisée à des fins agricoles. La région est en stress hydrique et les ressources des aquifères sont surexploitées. Les 5000 m³ d'EU générés chaque jour par les 100 000 habitants de la ville sont acheminés à la STEP où ils subissent un traitement secondaire. Les

eaux issues de ce traitement sont ensuite acheminées vers les trois bassins d'infiltration, représentant une surface totale de 4500 m² (3x1500 m²) et une capacité d'infiltration de 1500 m³ /jour. La percolation au travers des couches géologiques supplée à un traitement tertiaire. Le taux de recharge de la nappe est estimé à 0,5.10⁶ m³/an (Cherif et al., 2013). La qualité de l'eau de cette nappe, selon les normes récemment élaborées par les autorités tunisiennes, permet son utilisation uniquement pour l'irrigation. La nappe rechargée apporte ainsi une ressource complémentaire pour l'irrigation des 8480 ha des terres agricoles de la région. La recharge de cette nappe permet également de lutter efficacement contre l'intrusion du biseau salé. Ce projet expérimental présente ainsi une double dimension agricole et environnementale.

Cas n°2 : Dakar, Sénégal

Ce projet porté par l'ONG sénégalaise ENDA (Environnement et Développement du Tiers Monde) et le LATEU (Laboratoire d'Analyse et Traitement des Eaux Usées de Dakar) a pour objectif de fournir des EU sans danger pour l'agriculture périurbaine de la Niaye de Dakar en mettant en place des stations pilotes.

Les Niayes de Dakar font partie de la région des Niayes constituant toute la côte Nord du Sénégal. Cette région, longue de 180 km et large d'une trentaine de kilomètres, se compose de dunes et dépressions propices à l'agriculture maraîchère. 80% de la quantité de légumes consommés dans le pays y est produite. Le maraichage périurbain, comme celui réalisé dans la Niaye de Dakar, est une pratique en expansion dans les grandes villes africaines et constitue l'unique source de revenu pour la moitié des maraîchers. Ces derniers sont pour une grande part des migrants pauvres venus des régions rurales. Ce maraichage périurbain pose des problèmes sanitaires et de salinisation ainsi qu'un risque d'alcanisation des sols en partie du à l'utilisation d'EU non traitées pour l'irrigation. Dans la région de Dakar, cette pratique a lieu aujourd'hui uniquement au sein de la Niaye de Pikine, représentant une surface de 16 ha. 32% de l'irrigation des cultures maraîchères y est réalisée avec des eaux usées. La Niaye de Pikine compte 5000 exploitations et 1500 producteurs appartenant tous à une économie informelle. Ils sont des petits producteurs, des employés agricoles, des acheteurs en gros, des marchands au détail, des transporteurs, des transformateurs, des éleveurs et des vendeurs d'intrants (Andre et al., 2010). Seuls 850 maraîchers de cette zone utilisent les EU pour irriguer leurs terres. Ces derniers préfèrent utiliser cette ressource ayant constaté que leurs cultures arrivaient à maturité plus rapidement.

La première phase du projet de REUT a été initiée en 1994 avec l'installation de la station pilote ENDARup dans le quartier de Castor (Dakar). Cette station se compose d'un bassin de décantation et de 6 bassins de lagunage à l'aide d'eau permettant de traiter les 75 m³ d'eaux grises produites par jour par le quartier. Pour un temps de séjour de 38 jours, le procédé permet de répondre aux normes de l'OMS en matière d'irrigation (Andre et al., 2010). Les eaux grises traitées sont ainsi utilisées pour l'irrigation des cultures maraîchères (volumes inconnus). En 2003, la seconde phase a consisté en l'installation d'une station pilote mixte dans le quartier de Yoff Tengor se composant d'un filtre à gravier et de fosses septiques permettant respectivement le traitement des eaux grises et des excréments produits par une quinzaine de maisons. Les boues de vidanges font actuellement l'objet d'un compostage avant d'être épandues sur les terres et les eaux traitées sont utilisées pour l'irrigation des champs. En 2012, a débuté l'étude de la troisième phase et a pour objectif d'améliorer la valorisation des boues de vidanges des fosses septiques.

Cas n°3 : Cuttack, Kokalta (Calcutta), Inde

Calcutta dispose du plus grand complexe piscicole au monde avec 3800 ha alimentés par des EU (eaux noires + eaux grises) (World Health Organisation, 2006). Dans la région Est de Kokalta, la ville de Cuttack (10 000 000 habitants) utilise une technique traditionnelle pour épurer ses EU et constitue un modèle en matière de réutilisations multiples aquacole et agricole (Raychaudhuri et al., 2008). Chaque jour, $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'EU brutes sont conduites via des canaux jusqu'à une station expérimentale implantée en 1994 et située à une dizaine de kilomètres de la ville. Les procédés épuratoires sont basés sur les acquis ancestraux. Les EU subissent un premier traitement dans des étangs contenant des lentilles d'eau, puis un second dans des étangs contenant des carpes et des crevettes. Les organismes vivants dans ces mares vont permettre un abattement de la DCO et une réduction presque totale (96% à 99 %) des coliformes fécaux. Au bout de cinq jours, la qualité des eaux est améliorée, permettant ainsi leur utilisation pour l'irrigation de cultures maraîchères. Ce système permet de traiter un tiers des EU de la ville et fait vivre 4000 familles (Raychaudhuri et al., 2008).

Cas n°4 : Chennai, Inde

La municipalité de Chennai fournit depuis 1991 une partie de ses EU ayant subi un traitement secondaire à deux industriels. La raffinerie Madras reçoit $12 \cdot 10^6 \text{ l/jour}$ (soit $12\,000 \text{ m}^3/\text{j}$) et l'usine d'engrais Madras $16 \cdot 10^6 \text{ l/jour}$. Ces dernières disposent d'installations sur site leur permettant de finaliser le traitement de ces effluents secondaires. Ils subissent au sein des usines un traitement tertiaire puis une osmose inverse avant d'être réutilisés (Vinod et al., 2011). Les objectifs de qualité atteints sont ceux requis par les processus industriels employés. Ces installations sont financièrement rentables et le coût des installations de traitement amorti (Vinod et al., 2011).

Cas n°5 : Mezquital valley, Mexico

La « Mezquital valley » est la plus grande zone au monde (90 000 ha) irriguée avec des EU partiellement traitées provenant de la ville de Mexico. L'activité agricole qui y est pratiquée constitue une source de revenu pour 60 000 familles. Cette pratique a vu le jour en 1896, apparaissant comme une solution au stockage des EU de la ville et palliant à l'absence d'un système de traitement. Aujourd'hui, l'assainissement s'est développé et près de 60% des EU, soit environ $150\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$, qui y sont acheminées seraient traitées (Jiménez et Asano, 2008). La Mezquital Valley est située au-dessus d'un aquifère et l'irrigation de cette zone a participé à sa recharge, non sans dommages. La ville de Mexico fait face à un manque d'eau de plus en plus pressant et un projet de d'utilisation de cette ressource pour produire de l'eau potable est aujourd'hui à l'étude.

Parmi les cas présentés ici, seule la Tunisie dispose d'une législation propre. La ville de Mexico est actuellement en train de mettre en place une législation et les autres pays doivent en théorie répondre aux directives de l'OMS.

ANALYSE DES PRATIQUES DES PAYS EN DEVELOPPEMENT

LES FACTEURS DETERMINANTS DANS LE CHOIX DES PROCESS DE VALORISATION

De l'analyse transverse des cas de REUT réalisée dans la partie précédente, l'usage identifié comme prépondérant est l'irrigation agricole. Le second usage prépondérant est l'utilisation des EU en aquaculture. Ce constat est cohérent avec la répartition des proportions actuelles d'utilisation de l'eau douce (cf. pp. 10). Les moteurs des projets de REUT, sont relativement indépendants des décisions politiques. La plupart des actions REUT semblent, dans de nombreux pays, encore relever de démarches expérimentales et d'actions pilotes. A ce jour, peu ou pas de pays ont systématisé la REUT, notamment en l'intégrant dans les politiques nationales.

Les projets de REUT résultent d'une combinaison de facteurs tels que le stress hydrique, une urbanisation et une demande en nourriture croissantes. C'est donc le contexte socio-économique et hydrique des pays qui va conditionner le choix d'une valorisation (Plan bleu pour la Méditerranée et al., 2012). L'exemple le plus représentatif rencontré en Afrique Subsaharienne et dans certaines régions de l'Asie est le maraichage périurbain. Cette activité est en pleine expansion en réponse à une forte croissance de la population urbaine, à la hausse des prix des denrées alimentaires et à un assainissement défaillant. Elle est pratiquée par les populations pauvres (généralement des ruraux ayant migré récemment vers les villes) et constitue pour la plupart d'entre elles leur unique source de revenus.

L'ACCEPTABILITE DE L'UTILISATION DES PRODUITS DE VALORISATION

Parmi les cas étudiés concernant l'utilisation d'EU pour l'irrigation, au Sénégal, au Vietnam et à Mexico, les agriculteurs préfèrent utiliser les EU en raison de leur contenu en éléments fertilisants. Dans les zones où il existe un stress hydrique, ces derniers présentent néanmoins une certaine méfiance face à la mise en place d'un projet de REUT en raison d'une limitation sur les volumes prélevés imposée par ces projets. La mise en place du projet à Korba, partageant la ressource entre usages environnementaux et agricoles, a ainsi fait l'objet de protestations de la part des agriculteurs. Ceci montre la nécessité d'intégrer les EU aux plans de gestion de la ressource en eau.

Dans les pays où une pratique de réutilisation des EU contrôlée ou non est ancrée depuis longtemps les utilisateurs (agriculteurs et aquaculteurs) sont plutôt conciliants envers les projets de REUT leur prodiguant une ressource plus sécurisée. Ce n'est pas le cas pour toutes les régions du monde ou tous les types de valorisations. La population a alors besoin d'être sensibilisée et informée pour qu'un projet de REUT soit accepté et ne pas générer de peurs infondées.

Le facteur qui est peut-être le plus déterminant dans l'acceptabilité des utilisateurs d'EU traités est la fixation d'un prix d'accès à la ressource en adéquation avec le contexte socio-économique des utilisateurs. La mise en place d'un projet de REUT modifie les comportements des utilisateurs qui doivent alors s'adapter à un nouveau mode d'utilisation de la ressource en eau et payer. Si les enjeux ne sont pas bien perçus par la population, le projet de REUT a toutes les chances d'être rejeté. Il existe d'ailleurs plusieurs exemples d'abandon de stations de traitements pilotes. Des formations sont nécessaires pour que les agriculteurs, dans le cas de REUT agricole, adoptent de bonnes pratiques.

Dans les PED, lorsque la pratique n'est pas ancrée traditionnellement, les consommateurs ignorent la plupart du temps qu'ils consomment des produits issus d'une réutilisation d'EU parfois à risques.

LA PRISE EN COMPTE DES ENJEUX ECONOMIQUES

Les enjeux économiques de la REUT doivent être considérés sur le long terme, les infrastructures qu'elle requiert mettant en jeu d'importants investissements financiers. La viabilité économique des processus de REUT est souvent sous-estimée par les décideurs. L'analyse coût-bénéfice (ACB) est un outil particulièrement bien adapté pour ceux-ci puisqu'il permet d'évaluer l'impact socio-économique d'un projet de REUT sur le long terme. En France des ACB ont ainsi montré que l'irrigation de terrains de golf avec des EU traitées était plus rentable sur le long terme qu'avec des eaux conventionnelles. Dans les pays en développement, les projets étudiés n'ont, à notre connaissance, pas fait l'objet de telles analyses. Pourtant, dans ces pays où l'assainissement peut être défaillant, la REUT contrôlée se présente comme une alternative à un assainissement conventionnel coûteux, et donc économiquement rentable sur le long terme. Dans les PED, il est nécessaire que les démarches pilotes fassent l'objet d'une analyse économique rigoureuse, portant sur la rentabilité globale de l'investissement, les coûts d'exploitation et les modalités de recouvrement de ces coûts.

Un autre frein majeur observé sur les cas recensés, principalement situés dans des métropoles subissant une forte urbanisation, est le foncier. Il est en effet difficile pour les porteurs de projets de faire valoir l'acquisition des surfaces nécessaires à un système de REUT face aux institutions locales.

ASPECTS SANITAIRES

En principe, lorsqu'elle est maîtrisée et contrôlée, la REUT ne présente pas de dangers sanitaires. Néanmoins, lorsque son utilisation pour l'irrigation est localisée près d'un aquifère, elle peut contaminer des ressources en eau potable, car ne présentant alors pas la qualité requise pour un tel usage. C'est le cas de la Mezquital Valley où un usage d'EU insuffisamment traitées pour l'irrigation a conduit à la recharge non planifiée d'une nappe, compromettant ainsi son usage direct en eau potable. Dans les PED où la réutilisation d'EU intervient de façon spontanée et sans contrôle, cette pratique présente de réels dangers sanitaires. Certaines études montrent que la REUT peut être un vecteur de pandémies. Dans un contexte de manque d'eau, les gestionnaires peuvent être contraints sous la pression des agriculteurs à fournir des produits non finalisés et présentant donc un risque potentiel aussi bien sanitaire qu'environnemental.

Les risques sanitaires sont donc réels, voire importants dans certains contextes. Le recours à la REUT pose donc l'enjeu de la conformité sanitaire dans les PED, qui se décline au moins en trois questions : Quelles mesures mettre en œuvre ? Qui peut les mettre en œuvre ? Et comment financer le coût de telles mesures ?

ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

La REUT peut à la fois régénérer et détériorer l'environnement. Lorsque son impact environnemental est mal évalué, son usage peut conduire à une salinisation et à une déstructuration des sols dans le cas d'une valorisation agricole ou encore conduire à une

eutrophisation des milieux naturels. Comme pour les aspects sanitaires, cet aspect semble particulièrement délaissé, et les mêmes questions se posent en matière de mesures et de contrôles.

ASPECTS SOCIAUX (CREATION D'EMPLOIS, ETC.)

La mise en place d'un projet de REUT est génératrice d'emplois comme en témoigne la REUT pratiquée à Kokalta. Des emplois sont créés au sein même des stations mais également à leurs alentours lorsque le projet requiert un convoyage tel que le transport des matières de vidange des fosses septiques. L'irrigation des surfaces par des EU traités conduit à une augmentation de la productivité agricole et à la création d'emplois aussi bien en lien avec la production que du commerce des produits. Mais, ces créations d'emplois restent dépendantes de la robustesse économique du dispositif de REUT mis en place (cf La prise en compte des enjeux économiques).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans les PED, les projets de REUT présentent des atouts économiques, sociaux et environnementaux. Ils sont particulièrement attrayants pour l'agriculture qui en est le consommateur le plus spontané.

Cependant, ces projets manquent de visibilité sur la viabilité économique ainsi que sur les bénéfices tant financiers, environnementaux et sociaux qu'ils peuvent générer. Ces limites fortes empêchent leur développement massif. Un autre frein est le risque inhérent associé à la valorisation d'un matériau initialement pathogène. La question du risque sanitaire et environnemental se pose et bien peu de PED sont aujourd'hui en mesure de garantir un usage sans risque.

Néanmoins, un certain nombre d'indicateurs suggèrent que la REUT a potentiellement un rôle de premier plan à jouer. Les différents continents connaissent une forte urbanisation et une croissance de la demande alimentaire qui sont associées à une pression sur les ressources en eau. La REUT offre un éventail de solutions pour faire face à ces enjeux, comme le développement d'une agriculture périurbaine, la recharge des aquifères, la lutte contre le biseau salé dans les villes littorales ou encore le développement de concept de ville durable et d'éco-quartiers.

Pour mieux comprendre la REUT et favoriser son développement il serait nécessaire :

- D'approfondir la connaissance des coûts liés à la REUT en particulier ceux liés à l'investissement, l'exploitation, l'entretien et la maintenance, pour les principales filières existantes. Ceci afin que les économistes et décideurs locaux soient en mesure de faire des choix en pleine connaissance de cause.
- De préciser les contextes et configurations socio-économiques, culturels et environnementaux pour lesquels la REUT est une option pertinente et est en mesure de proposer des produits répondant à une demande locale réelle, et économiquement compétitive.
- D'améliorer les outils de connaissance en créant des guides pratiques et méthodologiques pour que les décideurs et acteurs locaux puissent mettre en œuvre des projets de REUT.
- D'étudier et de référencer les cas de passage d'une REU spontanée présentant des risques, vers des REUT encadrées et certifiées exemptes ou presque, de risques sanitaires et environnementaux.
- De mieux comprendre la perception de la REUT par les décideurs politiques qui seuls sont en mesure de stimuler le secteur de manière significative
- D'instaurer un suivi réaliste sanitaire et environnemental

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agence Française de Développement, BRL Ingénierie, 2011. *Réutilisation des eaux usées traitées - Perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action*. Paris, AFD, 91 p.

Andre L., Cartier M., Demangel A., Jourdan L., Forite C., Nativel C., Rouyer G., Theriez A., Trocheris A., Wayaridri R., 2010. *Etude de faisabilité de projets de valorisation des eaux usées épurées de la Station d'épuration de Keur Saïb N'Doye-Thiès Nord, Sénégal*. Cergy, ISTOM - ENDA, 141 p.

Austin L.M., Van Vuuren S.J., 2001. Sanitation, public health and the environment: looking beyond current technologies. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 43 (1), pp. 29-33.

Aviron-Violet J., 2000. Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse. In: IWA, *The 1st World Water Congress*, Paris, 03-07/07/2000. Paris, IWA, pp. 1-38

Bunting S.W., 2007. Confronting the realities of wastewater aquaculture in peri-urban Kolkata with bioeconomic modelling. *Water Research*, 41 (2), pp. 499-505.

Cherif S., El Ayni F., Jrad A., Trabelsi-Ayadi M., 2013. Aquifer Recharge by Treated Wastewaters: Korba case study (Tunisia). *Sustainable Sanitation Practice*, 1 (14), pp. 41-48.

Condom N., 2012. *Réutilisation des eaux usées au Maroc*. Murcie, Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, 20 p. [Diffusé le 21-23/02/2013]

Costa-Pierce B.A., 2005. *Urban Aquaculture*. London, CABI, 312 p.

Drechsel P., 2010. *Wastewater irrigation and health assessing and mitigating risk in low-income countries*. London, Earthscan, 431 p.

Gaye M., Niang S., 2010. *Manuel des bonnes pratiques de l'utilisation saine des eaux usées dans l'agriculture urbaine*. Dakar, Enda éditions, 131 p.

Jiménez B., Asano T., 2008. *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs*. London, IWA Publishing, 649 p.

Jönsson H., Baky A., Jeppsson U., Hellström D., Kärrman E., 2005. *Composition of urine, faeces, greywater and biowaste for utilisation in the URWARE model*. Sweeden, Chalmers University of technology, 49 p.

Khai N.M., Ha P.Q., Öborn I., 2007. Nutrient flows in small-scale peri-urban vegetable farming systems in Southeast Asia—A case study in Hanoi. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122 (2), pp. 192-202.

- Louali S. M., 2003. *Capacité d'épuration des lentilles d'eau sous conditions africaines et valorisation de la biomasse produite*, Niger, Université Abdou Moumouni. 26 p.
- LeBlanc R.J., Matthews P., Richard R.P., Greater Moncton Sewerage Commission, United Nations Human Settlements Programme, 2009. *Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource*. Nairobi, (Kenya), United Nations Human Settlements Programme. 632 p.
- Makoni F., 2012. *Treated Domestic wastewater use for Agriculture Irrigation in Zimbabwe: Is it a viable economic venture? A Case of Bulawayo*. Johannesburg, WASH, 40 p. [Diffusé le 26-28/09/2012]
- Masundire H., Ketshogile B., Sushu D., Okatch H., 2012. *Wastewater Production, Treatment, and Use in Gaborone, Botswana*. Johannesburg, University of Botswana, 12 p. [Diffusé le 26-28/09/2012]
- Plan bleu pour la Méditerranée, Condom N., Lefebvre M., Vandome L., 2012. *La réutilisation des eaux usées traitées en Méditerranée : retour d'expériences et aide à l'élaboration de projets*. Paris, Agence Française de Développement, 67 p.
- Raschid-Sally L., Hoek W. Van Der, Ranawake M., International Water Management Institute, 2001. *Wastewater reuse in agriculture in Vietnam water management, environment and human health aspects: proceedings of a workshop held in Hanoi, Vietnam, 14 March 2001*. Colombo, (Sri Lanka), International Water Management Institute, 57 p.
- Schönning C., Stenström T.A., Stockholm Environment Institute, EcoSanRes Programme, 2004. *Guidelines for the safe use of urine and faeces in ecological sanitation systems*. Stockholm, Stockholm Environment Institute, 53 p.
- Scott C.A., Faruqi N.I., Raschid-Sally L., International Water Management Institute, International Development Research Centre (Canada), 2004. *Wastewater use in irrigated agriculture confronting the livelihood and environmental realities*. India, IWMI, 208 p.
- Tanawa E., 2003. *Gestion et valorisation des eaux usées dans les zones d'habitat planifié et leurs périphéries*. Yaoundé, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique Laboratoire Environnement et Sciences de l'eau, 167 p.
- Teklu S., 2012. Waste water production, treatment and agricultural use in Ethiopia: The case of Addis Abeba city. In: UNWATER, *The 3rd Regional Workshop for Anglophone Africa Johannesburg*, South Africa, 26-28/09/ 2012. Addis Abeba, Ministry of Water and Energy, p. 4.
- Vinod T., Purnendu B., Subrata H., Ligy P., 2011. *Review of Wastewater Reuse Projects Worldwide - Collation of Selected International Case Studies and Experiences*. Kanpur, Gangapedia, 59 p.
- Vinneras B., 2002. *Possibilities for Sustainable Nutrient Recycling by Faecal Separation Combined with Urine Diversion*. Thèse doctorale, Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences, 88 p.

World Health Organization , 2006. *Excreta and grey water use in agriculture*. Geneva, World Health Organization, 254 p. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, vol.2.

ANNEXE « LISTING DES CAS REFERENCES »

N°	Localité	Pays	Type d'effluents	Nature de la valorisation	Référence
MAGREB ET MOYEN ORIENT					
1	Korba	Tunisie	Eaux usées traitées	Recharge de nappe Lutte contre l'intrusion du biseau salé Protection environnementale	(Agence Française de Développement et BRL Ingénierie, 2011) (Cherif et al., 2013)
2	Khouribga	Maroc	Eaux usées traitées	Industrie : lessivage des phosphates	(Plan bleu pour la Méditerranée et al., 2012) (Condom, 2012)
3	Amman	Jordanie	Eaux usées traitées	Irrigation de cultures céréalières Soutien d'étiage	(Agence Française de Développement et BRL Ingénierie, 2011)
4	Sekem	Egypte	Eaux usées traitées	Irrigation de forêt	(Vinod et al., 2011)
AFRIQUE SUB-SAHARIENNE					
5	Ouagadougou	Burkina Faso	Eaux usées traitées	Irrigation : maraîchage Périurbain	(Agence Française de Développement et BRL Ingénierie, 2011)
6	Keur Saïb N'Doye - Thiès Nord	Sénégal	Eaux usées traitées	Irrigation : maraîchage Elevage Pisciculture Arrosage d'espaces verts	(Andre et al., 2010)
7	<i>Niayes de Pikine et Patte d'Oie - Dakar</i>	Sénégal	Eaux usées traitées/brutes Eaux usées diluées	Irrigation : maraîchage Lutte contre la salinisation des sols	(Gaye et Niang, 2010)
8	Niamey	Niger	Eaux usées traitées	Pisciculture	(Louali, 2003)
9	Yaoundé	Cameroun		Pisciculture	(Tanawa E., 2003)
10	Kumasi	Ghana	Boues de vidange Eaux usées traitées	Agriculture Irrigation : - Maraîchage - Horticulture - Espaces verts	(Scott et al., 2004)
11	Nairobi	Kenya		Irrigation	(Scott et al., 2004)
12	Harare	Zimbabwe	Eaux usées traitées	Irrigation de pâturages	(Jiménez et Asano, 2008)
13	Mutare	Zimbabwe	Boues	Irrigation de plantation de caoutchouc	(Jiménez et Asano, 2008)
14	Bulawayo	Zimbabwe	Eaux usées traitées	Irrigation de plantation de caoutchouc	(Makoni, 2012)
15	Addis Abeba	Ethiopie	Eaux usées traitées	Irrigation	(Teklu, 2012)
16	Gaborone	Bostwana		Irrigation : agriculture, golf, jardins	(Masundire et al., 2012)
ASIE					
17	Singapour	Singapour	Eaux usées traitées	Industrie	(Vinod et al., 2011)
18	Hanoï	Vietnam	Eaux usées traitées	Agriculture périurbaine Aquaculture	(Khai et al., 2007) (Raschid-Sally et al., 2001)
19	Tianjin	Chine	Eaux usées traitées	Industriel et municipal	(Jiménez et Asano, 2008)
20	Beijing	Chine	Eaux usées traitées	Industriel	Jiménez et Asano, 2008)
21	Bangalore	Inde	Eaux usées traitées	Industrie	(Vinod et al., 2011)
22	Chembur	Inde	Eaux usées traitées	Industrie	(Vinod et al., 2011)
23	Chennai	Inde	Eaux usées traitées	Industrie (Raffinerie et usine d'engrais)	(Vinod et al., 2011)
24	Vadodara	Inde	Eaux usées traitées (hautement polluées)	Industrie	(Vinod et al., 2011)

25	Ganganagar	Inde	Eaux usées traitées	Irrigation de cultures maraîchères Chasse d'eau	(Vinod et al., 2011)
26	Madras	Inde	Eaux usées traitées	Domestique: - Jardinage - Chasse d'eau	(Vinod et al., 2011)
27	Kolkata	Inde	Eaux usées traitées	Aquaculture Agriculture	(Bunting, 2007), (Costa-Pierce, 2005), (Raychaudhuri et al., 2008)
28	Haroonabad	Pakistan	Eaux usées traitées	Agriculture	(Hoek, 2002)
AMERIQUE LATINE					
29	Mezquital valley, Mexico	Mexique	Eaux usées traitées	Irrigation (zone irriguée la plus importante du monde)	Jiménez et Asano, 2008)
30	Juarez	Mexique	Eaux usées T et NT	Irrigation A terme : industriel	Jiménez et Asano, 2008)
31	Campo espero, grand mendoza	Argentine	Eaux usées traitées	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
32	Fortaleza	Brésil	Eaux usées traitées	Irrigation Aquaculture	(Jiménez et Asano, 2008)
33	Sao-Paulo	Brésil	Eaux usées traitées	Nettoyage urbain	(Jiménez et Asano, 2008)
34	Cochabamba	Bolivie	Eaux usées traitées	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
35	Antofagasta	Chili	Eaux usées traitées	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
36	Santiago	Chili	Eaux usées traitées	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
37	Ibague	Colombia	Eaux usées traitées	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
38	Porto Viejo	Equateur	Eaux usées T et NT	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
39	Solola	Guatemala	Eaux usées traitées	Environnementale : lutte contre l'eutrophisation du lac Atlitán	(Jiménez et Asano, 2008)
40	Luque	Paraguay	Eaux usées NT	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
41	Miraflores	Peru	Eaux usées T	Irrigation Aquaculture (Tilapia)	(Jiménez et Asano, 2008)
42	San augustin	Peru	Eaux usées NT	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
43	Taena	Peru	Eaux usées NT	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)
44	La Vega	République Dominicaine	Eaux usées diluées	Irrigation	(Jiménez et Asano, 2008)