RÉUTILISATION DES EAUX USÉES POUR L'IRRIGATION AGRICOLE EN ZONE PÉRI-URBAINE DE PAYS EN DÉVELOPPEMENT :

PRATIQUES, DÉFIS ET SOLUTIONS OPÉRATIONNELLES

Egypte - Agriculture dans le Delta du Nil © Condom, 2015

AUTEURS : Nicolas Condom, Dr. (Ecofilae), Rémi Declecq (Ecofilae)
CONTRIBUTEURS : Pierre Louis Mayaux (CIRAD),
Philippe Roux et Laetitia Guerin-Schneider (IRSTEA)
RELECTEURS : Marjolaine Cour, Frédéric Maurel et Sébastien Demay (AFD),
Sami Bouarfa et Bruno Molle (IRSTEA), Pierre Savey (BRL),
Dijella Bagoudou (CACG), Jacques Beraud (SCP), Yvan Kedaj (réseau Swelia),
Jean Michel Clerc (Transfert LR) et Caroline Coulon (AFEID)

ecofilae AFEID afd AGENCE FRANÇAISE DE DÉVELOPPEMENT

COSTEA
Pour une irrigation durable

RÉSUMÉ

La réutilisation des eaux usées est aujourd'hui un levier sous-exploité face aux enjeux de déficit en eau et de dégradation des milieux et des conditions sanitaires. La mise en place de projets de réutilisation des eaux usées durables et sécurisés requiert que les acteurs, qu'ils soient gestionnaires ou financeurs, disposent des éléments clés pour anticiper les risques et proposer des solutions adaptées aux usages et aux territoires.

L'agriculture est un secteur qui depuis longtemps valorise les eaux usées brutes, en dehors de toute planification. Aujourd'hui, au Nord comme au Sud, la réutilisation des eaux usées pour l'agriculture intéressent les politiques et décideurs locaux. Des projets de traitement des eaux incluant un volet réutilisation agricole émergent et le besoin de faire évoluer les cadres légaux, réglementaires et institutionnels se font ressentir en même temps que la nécessité d'accompagner et renforcer les capacités de l'ensemble des acteurs.

Sur la base de retours d'expériences détaillés, d'une mise à jour des connaissances récentes et d'analyses des pratiques, des freins et des solutions opérationnelles, ce rapport guide et oriente les lecteurs-acteurs dans leur projet. Il propose des recommandations et des perspectives pour de futurs et nécessaires développements de connaissances, de méthodologies ou de technologies.

Centré sur les usages agricoles en zones péri-urbaines de pays en développement, ce rapport aborde ainsi les enjeux (i) de sécurisation des filières de réutilisation d'eaux brutes ; (ii) de choix de filières de traitement adaptées ; (iii) d'impacts sur les ressources ; (iv) des processus politiques, institutionnels et réglementaires ; et (v) d'évaluations économiques et environnementales par des outils d'aide à la décision.

PRÉAMBULE

Cette étude est le résultat d'un travail conduit dans le cadre du Chantier *Réutilisation des eaux usées en agriculture*. Il s'ancre dans l'axe Performances techniques et environnementales du COSTEA[1], Comité Scientifique et Technique Eau Agricole

Le COSTEA est un réseau d'acteurs financé par l'AFD et animé par l'AFEID, dont la finalité est de contribuer à l'évolution des politiques d'irrigation des pays partenaires de l'AFD, afin qu'elles adoptent les meilleures options institutionnelles, techniques et économiques de mobilisation des ressources en eaux pour améliorer la productivité et réduire la vulnérabilité des exploitations agricoles familiales au Changement Climatique, sans externalité négative pour l'environnement et dans le respect des principes de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE).

L'objectif global du COSTEA est d'actualiser et de renforcer (i) la mise en cohérence des expériences, outils et actions, (ii) les compétences et capacités des partenaires de l'AFD, acteurs des politiques de l'eau agricole de ses pays d'interventions et acteurs français qui les accompagnent.

Dans ce cadre, il a été convenu de conduire une étude sur **la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation agricole en zones péri-urbaines de pays en développement.**

L'étude a été conduite en 2015 par le cabinet de conseil Ecofilae[2], essentiellement sur la base de son expertise, de **recherches bibliographiques complémentaires et d'échanges avec des personnes ressources**. L'étude a été conçue, orientée et suivie dans une démarche collective impliquant des institutions partenaires du COSTEA : l'AFD, l'IRSTEA, BRL, CACG, SCP, le réseau Swelia et Transfert LR. Un comité de suivi composé de représentants de ces institutions s'est réuni au démarrage, à un point d'étape intermédiaire, et à la remise du rapport, pour commenter, enrichir, valider les propositions d'Ecofilae. L'étude a été rédigée en français. Certains tableaux, schémas et figures sont en anglais afin de faciliter leur diffusion.

L'AFEID, en collaboration avec le Groupe de Travail Poor Quality Water de la Commission Internationale pour l'Irrigation et le Drainage, a organisé une table ronde « Réutiliser les eaux usées : l'heure est aux solutions ! », pour donner une occasion supplémentaire d'alimenter l'étude par des expériences internationales en cours. Cette table ronde s'est tenue le 13/10/2015 à Montpellier, dans le cadre de la conférence ICID 2015 'Innover pour améliorer les performances de l'irrigation' et a été animée par Nicolas Condom[3], Akica Bahri[4] et Samia El Gendy[5].
L'ensemble des interventions est consultable sur le site icid2015.sciencesconf.org.

Les acronymes EUB (eaux usées brutes), EUT (eaux usées traitées), REUB (réutilisation des eaux usées brutes), REUT (réutilisation des eaux usées traitées) et STEP (station de traitement des eaux usées) sont fréquemment utilisés dans ce rapport. Les définitions des « eaux usées brutes » et des « eaux usées traitées » ici considérées dans ce présent rapport sont respectivement présentées dans les introductions des Chapitres 1 et 2 de la Partie 2.

1 - Financé par l'Agence Française de Développement et animé par l'Association Française pour l'Eau, l'Irrigation et le Drainage, le COmité Scientifique et Technique Eau Agricole (COSTEA) est une communauté d'experts d'une très large diversité d'un point de vue ancrage géographique, compétences, institutions et métiers, ayant pour objet de travail commun, l'agriculture irriguée et pour but de contribuer à l'amélioration de l'efficacité des politiques et des projets d'irrigation. www.comite-costea.fr

2 - www.ecofilae.fr

3 - Président Fondateur d'Ecofilae

4 - Professeur à l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT)

5 - Présidente du Groupe de Travail Use of Poor Quality Water for Irrigation de la Commission International de l'Irrigation et du Drainage

RÉUTILISATION DES EAUX USÉES POUR L'IRRIGATION AGRICOLE EN ZONE PÉRI-URBAINE DE PAYS EN DÉVELOPPEMENT : pratiques, défis et solutions opérationnelles

RÉSUMÉ 2

PRÉAMBULE 2

INTRODUCTION 4

PARTIE 1 :
Éléments de contexte généraux et retours d'expériences de la réutilisation d'eaux usées en agriculture dans les pays en développement 6

PARTIE 2 :
Comment renouveler la manière d'aborder la réutilisation agricole des eaux usées ? 10

Chapitre 1 : Réutiliser des eaux usées brutes, faiblement traitées ou diluées, quels leviers pour améliorer les pratiques ? 11

Chapitre 2 : Quelles filières de traitement sont adaptées pour sécuriser les projets de réutilisation des eaux usées ? 16

Chapitre 3 : Quels impacts sur les ressources en eau, le sol et l'énergie ? 23

Chapitre 4 : Quels processus politiques, organisationnels, institutionnels et réglementaires? 31

Chapitre 5 : Quels outils et quelles méthodologies pour évaluer et décider ? 37

PRINCIPALES RECOMMANDATIONS POUR DES DÉVELOPPEMENTS FUTURS 43

SYNTHÈSES PAYS 44

SYNTHÈSES PROJETS 49

BIBLIOGRAPHIE 62

INTRODUCTION

OBJECTIFS ET DÉMARCHE

La présente étude a pour objectifs de **capitaliser sur des expériences en cours, de rassembler les connaissances nouvelles et d'analyser les pratiques, les défis et les solutions opérationnelles pour accompagner les utilisateurs-acteurs** de la réutilisation des eaux usées en agriculture en leur permettant de faire un lien plus évident entre la disponibilité d'une ressource en eau urbaine et les besoins en eau d'un territoire agricole péri-urbain à irriguer.

Elle propose ainsi :

- **un inventaire** (non exhaustif et contraint par la disponibilité de l'information dans la bibliographie) **de projets et d'expériences** de réutilisation agricole d'eaux usées, à travers le monde et à différentes échelles (pays, territoire, ou projet), avec une analyse **des freins auxquels ces expériences se sont confrontées**. Ces retours d'expériences, sources d'inspiration pour le lecteur, illustrent des points particuliers tout au long du rapport ;
- **un ensemble de solutions et de leviers d'actions** (options techniques et derniers développements méthodologiques) aux problèmes et freins identifiés, dans la perspective de mieux conduire les projets de réutilisation des eaux ;
- **un décryptage des lacunes qui aujourd'hui freinent la dynamique** de la réutilisation des eaux usées en agriculture et qui ouvrent donc le champ pour de nouveaux développements et tracent de nouveaux axes de recherche.

Cette étude fournit donc un matériau **opérationnel** dans la continuité des travaux qui la précédent. Elle est organisée selon un **cadre méthodologique intégrateur articulé autour de cinq grandes questions** qui préoccupent actuellement le développement de la réutilisation des eaux usées. Chacune de ces questions fait l'objet d'un chapitre dédié et organisé selon une approche **opportunités, menaces, avantages, inconvénients, lacunes et domaines à investiguer** pour de futurs développements, avec un continuel aller-retour vers le terrain pour tirer les enseignements des projets conduits dans le monde.

L'articulation de **deux approches complémentaires, la capitalisation de l'existant et l'analyse**, a été donc été recherchée tout au long du travail.

CADRAGE DE L'ÉTUDE

Les sources d'eaux et usages considérés sont précisés ci-dessous :

- **Types d'eaux :** l'étude traite de la **réutilisation des eaux usées urbaines et domestiques brutes (REUB) et traitées (REUT)**. Lorsque c'est pertinent, d'autres types d'effluents et les boues sont évoqués, mais sans faire l'objet d'analyse approfondie ;
- **Nature des usages : l'agriculture irriguée** est l'usage central de l'étude. Dans les pays et projets considérés, d'autres usages sont néanmoins parfois associés : arrosage de pratiquement tous les golfs de Tunisie, arrosage d'espaces verts de certaines villes marocaines, etc. La réutilisation et le recyclage industriel n'ont pas été considérés ;
- **Niveau de contrôle des usages :** seuls des projets de **réutilisation directe ou indirecte, en zone péri-urbaine**, ayant un degré minimum de **planification** ou de **contrôle** ont été décrits. Nombre de ces projets se sont néanmoins développés sur des pratiques existantes de REUB non planifiée et non contrôlée.

Échelles d'analyse et ciblage géographique de l'étude
2 échelles d'analyse sont utilisées pour les retours d'expérience.

Ainsi, **l'échelle du pays** (déployée sur cinq synthèses pays : la Tunisie, le Maroc, la Jordanie, l'Égypte et les Territoires Palestiniens) permet de comprendre la logique nationale vis-à-vis de la réutilisation, d'apporter ainsi de la consistance aux dialogues État-Bailleur et de prendre du recul sur la manière d'aborder les projets de réutilisation agricole des eaux usées dans ces contextes (stratégie nationale, planification régionale, projet local).

L'échelle de la ville ou du projet, avec tant que possible une analyse des filières de réutilisation, c'est-à-dire, depuis la source d'eaux usées brutes jusqu'à l'usage agricole, permet d'illustrer en pratique les freins, les solutions mises en œuvre et les bénéfices en conditions réelles.

L'étude commanditée par le COSTEA vise *in fine* à accompagner les acteurs français et leurs partenaires du Sud dans leurs réflexions sur la réutilisation agricole des eaux usées ; aussi, une attention particulière est portée aux pays des zones « prioritaires » du COSTEA que sont la **Méditerranée, l'Afrique de l'Ouest et l'Asie du Sud Est** (avec moins de cas documentés pour ces deux dernières régions), mais sans s'interdire d'analyser des expériences provenant d'autres régions.

CONTENU DE L'ÉTUDE ET ORGANISATION

Le rapport est découpé en 2 parties.

LA PARTIE 1 pose dans un premier temps les éléments de contexte généraux en présentant un **bref état de l'agriculture périurbaine** dans les pays en développement et en introduisant les moteurs et objectifs qui favorisent la réutilisation agricole dans ces pays. Ce contexte général posé, une synthèse des retours d'expériences aux échelles nationales et locales illustre la diversité des situations. Ces expériences sont détaillées dans les **Synthèses pays** et **Synthèses projets** en fin de rapport. Ces retours d'expérience sont ensuite mobilisés pour étayer des points d'analyse de la Partie 2.

LA PARTIE 2 est organisée en **5 chapitres** chacun orienté autour d'une grande question illustrant un des enjeux majeurs de la réutilisation. Le fil conducteur de cette partie consiste en un cheminement progressif qui vise à traiter les différentes composantes de la durabilité d'un projet de réutilisation agricole des eaux usées (sécurité, rentabilité, faisabilité, acceptabilité, efficience organisationnelle) telle que définie en Figure 2.

Les chapitres sont néanmoins rédigés de sortes à pouvoir être lus et compris de manière autonome. Sont donc abordées les questions de réutilisation des eaux usées brutes (Partie 2 - Chapitre 1), de choix de filières de traitement (Partie 2 - Chapitre 2), d'impacts de la réutilisation sur les ressources (Partie 2 - Chapitre 3), d'organisations et d'institutions (Partie 2 - Chapitre 4), et d'outils d'évaluation (Partie 2 - Chapitre 5). Certaines redites au fil des chapitres n'ont d'autres buts que de permettre une lecture par grande question, sans retours en arrière du lecteur, et ce afin de faciliter l'usage de ce rapport tel un guide.

Enfin, des recommandations sont proposées en guise de conclusion.

Thaïlande - Productions locales sur un marché de Bangkok © Coulon, 2017

PARTIE 1

ÉLÉMENTS DE CONTEXTE GÉNÉRAUX ET RETOURS D'EXPÉRIENCES DE LA RÉUTILISATION D'EAUX USÉES EN AGRICULTURE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

L'AGRICULTURE PÉRIURBAINE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT ET LES PRATIQUES ASSOCIÉES

L'agriculture périurbaine, tout comme l'agriculture urbaine (dite parfois agriculture « d'interstices »), n'est **pas marginale et a toujours existé** dans les grands centres urbains des pays en développement. La zone d'influence périurbaine se caractérise par des facilités pour accéder aux services et aux marchés mais également par de fortes pressions pour l'usage des ressources (Moustier P. (ed.) 1999). Cette activité joue ainsi un rôle majeur dans l'**approvisionnement des villes** en denrées alimentaires mais également pour le **maintien d'une activité économique locale**. Elle concerne principalement des métiers spécialisés, comme le maraîchage, le petit élevage dont l'aviculture, la pisciculture, mais également les activités de post-récolte associées.

Des pratiques de recyclage

Des activités de **recyclage de la matière organique** des déchets urbains se sont développées dans ces zones périurbaines : outre les eaux usées, les ordures ménagères à Brazzaville, les fumiers d'élevage à Bissau… Elles ont permis aux agriculteurs de bénéficier de ressources fertilisantes à faibles coûts bien que ces pratiques, souvent non contrôlées, engendrent de **forts risques sanitaires et environnementaux**. Les pesticides y sont également souvent utilisés de manière non raisonnée lorsque les agriculteurs y ont accès (Paule Moustier 1997).

Les cultures associées

Le maraîchage périurbain favorise, par rapport à l'agriculture rurale, la production de **cultures périssables et de cultures de type tempéré** (salades, aubergines, choux, carottes…) pour lesquelles l'accès aux intrants et à l'appui technique est plus facile en zone urbaine. Les produits non périssables plus indiqués pour la production extensive intéressent d'avantage les zones rurales (Paule Moustier 1997).

Une étude sur quatre villes d'Asie du Sud-Est (Hanoï, Ho Chi Minh Ville, Vientiane, Phnom Penh) a mis en évidence la **diversification des cultures** : maraîchage, riziculture, pisciculture et d'autres cultures (Bon Hubert (ed.) 2004).

Les **cycles culturaux courts** sont favorisés dans ces systèmes : certaines récoltes se font en moins de 60 jours, beaucoup d'intrants sont utilisés et les productions sont plus denses au m² qu'en zone rurale. Les **productions à forte valeur ajoutée** sont favorisées, permettant ainsi aux agriculteurs périurbains de bénéficier globalement de meilleurs revenus qu'en zone rurale. Les **surfaces par agriculteurs sont très variables** et peuvent aller de quelques centaines, voire dizaines, de m² à quelques hectares.

Les pratiques d'irrigation

Les cultures périurbaines sont **souvent irriguées** et les ressources disponibles utilisées sont souvent impactées par les activités urbaines.

Les **techniques d'irrigation sont généralement rudimentaires et indépendantes de la qualité des ressources utilisées**. L'**irrigation manuelle** à l'aide de bidons portés ou transportés de la source jusqu'à la parcelle (pratique courante en Afrique de l'Ouest) et l'**irrigation gravitaire** à la raie ou par submersion témoignent d'une irrigation et d'une agriculture souvent peu maîtrisées avec de forts risques sanitaires et environnementaux.

L'**irrigation localisée est souvent promue** et fortement subventionnée dans des objectifs de réduction de la pauvreté et d'augmentation de l'efficience de l'eau dans des contextes de rareté de l'eau. De nombreuses études ont mis en évidence les bénéfices sur les rendements, les revenus et la sécurité alimentaire de ces technologies.

Lorsqu'elle est mise en place, l'irrigation localisée nécessite une maîtrise de la qualité des eaux et une adaptation du matériel (filtration, nettoyage et changement de matériel). La transition vers ce type de système est considérée comme une étape de modernisation par les agriculteurs et peut les inciter à de futurs investissements ou à se tourner vers des cultures à plus haute valeur ajoutée et plus économes en eau. Néanmoins l'adoption de ces technologies est parfois limitée par les bénéfices qu'elles apportent à long terme quand les agriculteurs recherchent des bénéfices plus immédiats assurés (ex : Maroc).

Les bénéfices économiques

L'agriculture périurbaine est la plupart du temps **une activité de temps plein** pour une grande partie de la population

urbaine puisque **10 à 80 % des urbains en Afrique s'y consacrent**, pour l'autoconsommation, mais aussi pour la vente (Paule Moustier 1997). D'un point de vue économique cette activité vise à assurer un revenu décent aux agriculteurs et à satisfaire la demande des villes. Elle est donc d'une importance cruciale pour les revenus et l'alimentation des urbains dans un contexte de fort déséquilibre démographique entre ville et campagne et de paupérisation du milieu urbain.

Une activité en perpétuelle transformation

L'agriculture périurbaine n'est souvent **pas reconnue par les politiques agricoles et les planifications urbaines**. En raison de son caractère souterrain, dans de nombreuses villes les agriculteurs ne reçoivent aucune aide publique et échappent à tout contrôle de l'État, les pratiques ne sont alors pas contrôlées et s'orientent d'avantage vers des systèmes « de bricole ». De plus les agriculteurs opèrent souvent sans permis sur leur terrain, la **propriété foncière est alors très précaire**, surtout face aux pressions urbaines. Les procédures de protection contre l'expulsion sont rares.

L'irrémédiable extension des zones urbaines, marquées par des transformations soudaines et par l'augmentation de la population, transforme les terres rurales en périphérie des villes, tour à tour en zone d'agriculture périurbaine puis en zone urbanisée où subsistent parfois des espaces interstitiels pour l'agriculture urbaine. Cette évolution marque bien la précarité des zones agricoles périurbaines qualifiées de zones en permanente transformation (Paule Moustier 1997). Il en résulte **la problématique de la pérennité économique et agronomique des activités agricoles des espaces périurbains** (Moustier P. (ed.) 1999)

LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES DANS L'AGRICULTURE PÉRIURBAINE DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Une des solutions à la pénurie

Pour faire face aux pénuries en eau, il existe un ensemble de leviers (Figure 1) agissant sur l'offre (stockage, dessalement..) et d'autres agissant sur la demande (modernisation des systèmes d'irrigation, sensibilisation,..). Ces leviers peuvent être parfois concurrents, parfois complémentaires et mis en mise en place de manière séquencée, guidée par une question de rationalité économique et de facilité de mise en place.

La REUT est un levier très performant mais de loin le plus complexe à mettre en œuvre car il requiert un **changement complet de paradigme**, l'approche est forcément **pluridisciplinaire, multi-acteurs** avec des allers-retours entre contexte national et local, et spécifique à chaque contexte (cf analyse Plan Bleu 2012). Cette complexité pousse les acteurs à différer ces projets et à préférer d'autres options plus conventionnelles pour résoudre les problèmes d'adéquation offre/demande.

Moteurs et objectifs

La réutilisation des eaux usées brutes (REUB) est une pratique très ancienne dans les zones périurbaines de nombreuses villes de pays en développement. **La plupart des projets planifiés de réutilisation des eaux usées traitées (REUT) actuels se sont développés sur un passif préexistant de réutilisation non-contrôlée, souvent anarchique et spontanée de valorisation agricole des eaux usées brutes.**

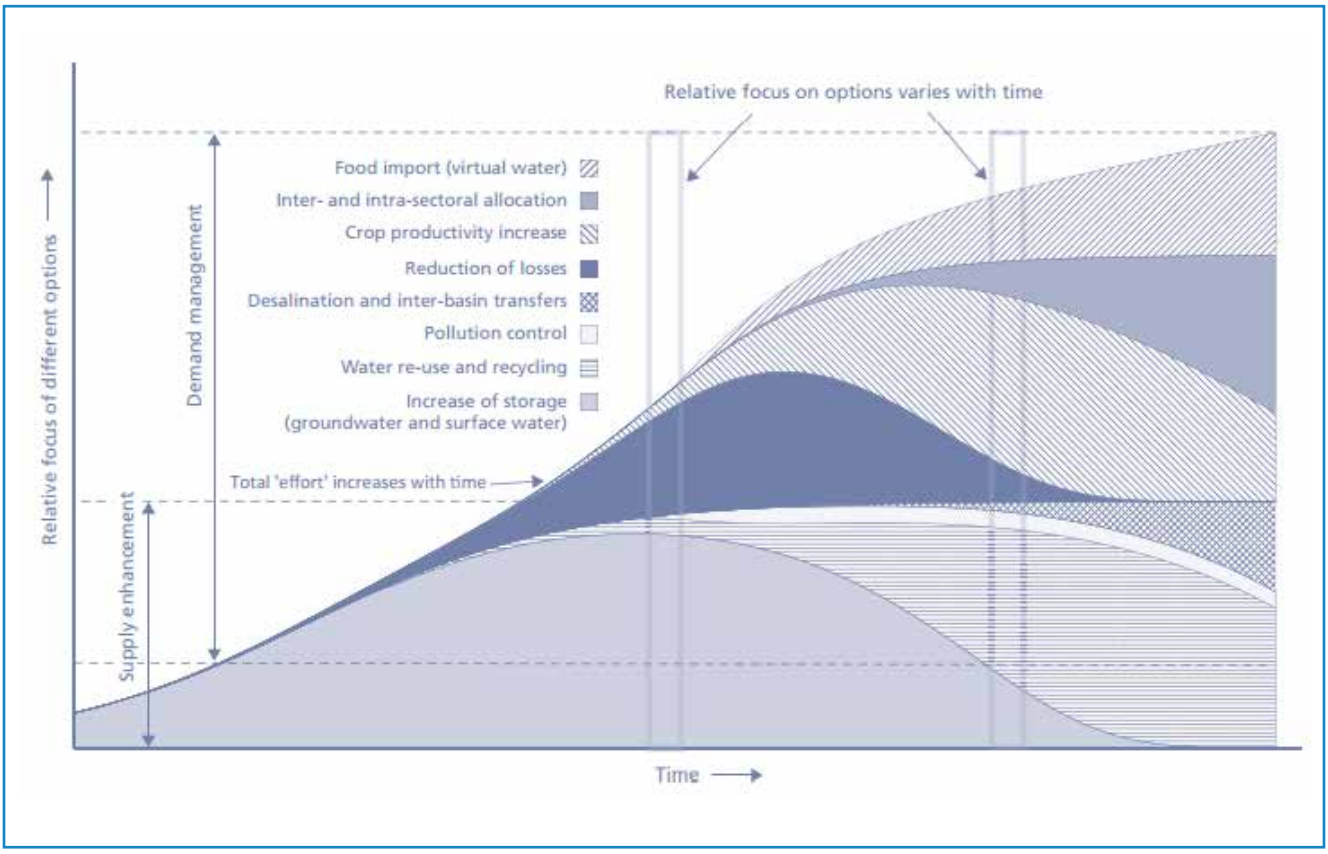


FIGURE 1 : Représentation schématique des différents leviers du secteur agricole pour faire face à différents niveau de pénurie en eau – FAO, 2012

Dans les pays en développement, de fortes quantités d'eaux usées brutes ne peuvent toujours pas être traitées à cause d'**infrastructures limitées et déficientes de collecte et de traitement**. Mais aujourd'hui la possibilité de réutilisation des eaux usées traitées commence à être intégrée à chaque projet de nouvelle construction de stations de traitement, de façon plus ou moins évidente selon les pays.

Les **principales forces motrices** incitant à la mise en place de **projets contrôlés et planifiés de REUT**, dans ces contextes spécifiques, sont :

- **la forte croissance démographique** en zones urbaines et périurbaines (souvent incontrôlée) entrainant conjointement une **diminution des ressources en eau** (ratio de ressources en eau par habitant – indicateur de Falkenmark) que renforce les effets du **changement climatique**, et une **demande alimentaire croissante**, apportant un regard nouveau sur les eaux usées vues non plus comme un déchet à évacuer mais comme une ressource locale pouvant être valorisée dans un système productif ;
- une exigence de **produits de qualité** sans risque sanitaire motivant le contrôle et l'amélioration de la qualité des eaux (brutes) auxquelles recourent les agriculteurs périurbains ;
- le **prix des ressources** en eaux conventionnelles globalement en augmentation.

Ainsi, dans les pays en développement, les **projets de REUT sont associés au développement et à la maîtrise de l'assainissement** (opportunité offerte par l'installation d'une station), mais aussi aux aspects de gestion de **la salinité des sols** et de **gestion des ressources en eau** (facteurs motivant l'épuration des eaux). Ils deviennent ainsi multi-objectifs :

- pallier au déficit en termes de traitement / collecte des eaux usées brutes ;
- limiter les risques environnementaux (pollution et salinisation des nappes et des eaux de surface ainsi que des sols) et sanitaires liés au rejet et à la réutilisation non contrôlée des eaux usées brutes en zone péri-urbaine ;
- fournir une ressource supplémentaire en eau, de qualité suffisante pour l'irrigation ;
- préserver les autres ressources en termes de quantité, pour d'autres usages (nappe, eau potable, eau de surface…) ;
- préserver et développer une agriculture périurbaine de qualité.

RETOURS D'EXPÉRIENCES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES ET POUR DIFFÉRENTES APPROCHES DE LA RÉUTILISATION

Le manque de données et de retours d'expériences publiés expliquent la variabilité dans la description des cas présentés qui n'ont pu être l'objet d'investigations de terrain dans le cadre de cette étude. Les expériences nationales et locales sont ici synthétisées en extrayant leurs points saillants, les détails figurent dans les Synthèses pays et Synthèses projets en fin de rapport.

Analyse de stratégies nationales

Ces retours d'expériences visent à évaluer et comparer la maturité de 5 pays de la région **MENA (Middle East North African Country)** par rapport à la dynamique de réutilisation des eaux usées, en mettant en évidence les moteurs et facteurs contextuels, les expériences remarquables, les contraintes et solutions apportées, et les enjeux pour l'avenir. Ces cinq pays connaissent tous un contexte relativement similaire de rareté de l'eau, mais présentent pour autant une gamme étendue de types, de niveaux de développement, et d'intégration politique de la REUT. En quelques mots :

- En **Tunisie** (Pays 1) les bénéfices de la REUT à des fins agricoles, environnementales ou même industrielles ne sont plus à démontrer : beaucoup de travaux de recherche et de développement y ont été et y sont toujours conduits (Pays 1). Tous les golfs du pays sont irrigués avec des EUT, la recharge de nappe est également mise en œuvre.

- Au **Maroc** (Pays 2) le déficit hydrique et la volonté de contrôler et de limiter les pratiques anciennes de REUB constituent les principaux moteurs des projets de REUT. De nombreux projets émergent mais les applications restent limitées.

- La **Jordanie** (Pays 3) présente un taux de réutilisation très élevé : les eaux usées traitées sont réutilisées de façon indirecte après dilution avec les eaux d'une retenue. La gestion des boues reste une problématique majeure.

- En **Égypte** (Pays 4) la gestion des eaux usées est intrinsèquement liée aux eaux du Nil favorisant la réutilisation indirecte. Les pratiques agricoles et les cultures se sont adaptées à la qualité des eaux. De nombreux projets de REUT directe pour des productions non alimentaires se mettent en place. La réglementation reste très stricte en termes d'usages autorisés.

- En **Palestine** (Pays 5) les expériences de REUT sont faibles et complexes à mettre en œuvre dans des contextes extrêmes de pénurie en eau.

Analyse de retours d'expériences locales et de projets

12 expériences et projets locaux sont décrits depuis la source des eaux usées jusqu'à l'usage, et même parfois jusqu'au devenir de ces eaux dans l'environnement, dans la **Synthèses projets** en fin de rapport. Ces retours d'expérience présentent les freins rencontrés (lors de la mise en place et après) et les solutions apportées.

Toutes ces expériences sont des projets déjà mis en place (hormis le projet NGEST en Palestine et le projet de la ville de Bogota en Colombie, en cours de réalisation).

Le cas d'**Accra au Ghana** (Projet 1) est assez représentatif de ce qui se passe dans de nombreuses grandes villes d'Afrique : les capacités d'épuration sont très faibles et les eaux usées brutes, souvent en mélange ou partiellement diluées (eaux pluviales), sont utilisées pour irriguer des cultures maraichères en zones urbaines et périurbaines. Les surfaces irriguées avec des eaux usées dépassent largement celles irriguées avec des eaux conventionnelles. Ces eaux permettent le développement d'une agriculture diversifiée, intensive en main d'œuvre, sur de petites surfaces, et à proximité des foyers de consommation. Quelques agriculteurs parviennent à mettre en œuvre des mesures de protection de la santé (approche multi-barrières de l'OMS (Tableau 2).

TABLEAU 1 : Présentation d'expériences locales de réutilisation - Ecofilae

VILLE, PAYS	ORIGINE DE L'EAU	TRAITEMENT	VOLUMES D'EAU RÉUTILISÉS	TYPE DE RÉUTILISATION	PRODUCTIONS AGRICOLES	PLUS DE DÉTAILS
Accra, Ghana	Eaux domestiques principalement (via cours d'eau, canaux)	Pas de traitement	?	Directe et indirecte (mélange et dilution)	Maraichage principalement	Projet 1
Faisalabad, Pakistan	Mix eaux domestiques et eaux industrielles	Pas de traitement	?	Directe	Maraichage	Projet 2
Hanoi, Viet Nam	Eaux domestiques	Traitement sommaire (petites zones humides)	?	Directe	Aquaculture, maraichage, riz	Projet 3
Settat, Maroc	Eaux domestiques	Lagunage	2,04 mm^3/an	Directe	300ha de blé, fourrages, maïs, bersim, pommes de terre, oliviers	Projet 4
Ouagadougou, Burkina Faso	Mix eaux domestiques et eaux industrielles	Lagunage	16 mm^3/an	Directe	Maraichage	Projet 5
Delhi, Inde	Eaux domestiques	Boues activées	37 mm^3/an	Directe	Maraichage, horticulture	Projet 6
Dakar et ses environs, Sénégal	Eaux domestiques	Lagunage + boues activées	?	Directe	Maraichage, horticulture	Projet 7
Korba, Tunisie	Eaux domestiques	Lagunage + boues activées	0,55 mm^3/an (recharge de nappe)	Indirecte : pompage agricole en nappe souterraine	Maraichage, Fruits	Projet 8
Bande de Gaza Nord, Territoires Palestiniens	Eaux domestiques	Boues activées d'un côté (Jabaliya) et lagunage d'un autre (Beit Lahia) + bassins d'infiltration	2017 : 54 000 m^3/j 2025 : 69 000 m^3/j (pompage agricole)	Indirecte : pompage agricole en nappe souterraine	Arboriculture (agrumes, amandiers, oliviers), fourrages, fruits	Projet 9
Harare, Zimbabwe	Mix eaux domestiques et eaux industrielles	Filtres à lits biologiques	48 000 m^3/j	Directe (en mélange avec des boues)	Pâturage	Projet 10
Bogota, Colombie	Eaux domestiques	Traitement primaire et secondaire	?	Directe	?	Projet 11
Hadba El Khadra, Lybie	Mix eaux domestiques et eaux industrielles ?	? + Filtration sur sable	110 000 m^3/j	Directe	Fourrages, de légumes et de plantations brise-vent	Projet 12

La ville de **Dakar** (Projet 7) et d'autres villes des environs au **Sénégal** remédient quant à elles peu à peu à ce phénomène en planifiant et en contrôlant la REUT. Ainsi, par exemple, dans le quartier de Pikine à Dakar, où environ 160 agriculteurs irriguaient 16 ha à partir d'eaux usées brutes, les améliorations apportées sur le système d'assainissement et son extension permettent aujourd'hui d'irriguer avec des eaux usées traitées. Ces pratiques de REUT permettent ainsi de limiter les processus de salinisation des sols et des eaux souterraines, et de valoriser économiquement 3 % des eaux usées produites par la ville.

A **Hanoï** (Thanh Tri District) (Projet 3) au **Viet Nam**, l'épuration des eaux se fait au travers de basins d'aération, puis de dilutions. Tout comme à Accra, les pratiques des agriculteurs, mobilisant des mesures de protection de la santé, rendent plus sûre la réutilisation de ces eaux usées faiblement traitées. Les agriculteurs sont mobilisés dans la réussite du projet puisqu'ils sont responsables de l'exploitation d'une partie de la filière.

Après avoir testé l'irrigation de leurs cultures par des EUT, les agriculteurs de **Faisalabad au Pakistan** (Projet 2) sont revenus aux EUB qui impactent moins les sols (dimensionnement et choix de la technologie de traitement inadapté). Les performances économiques et agronomiques sont bien meilleures.

Des périmètres publics à proximité de **Settat au Maroc** (Projet 4) et de **Ouagadougou au Burkina Faso** sont dans les deux cas irrigués avec des eaux usées domestiques (et industrielles pour Ouagadougou) traitées par lagunage. A Ouagadougou, les eaux usées traitées desservent également un périmètre non officiel où la restriction de l'irrigation ne s'applique pas.

A **Korba en Tunisie** (Projet 8) et sur le projet NGEST dans les territoires Palestiniens les EUT sont réutilisées de manière indirecte après pompage dans la nappe.

A **Harare au Zimbabwe** (Projet 10) les eaux usées subissent des traitements différenciés selon qu'elles sont réutilisées pour l'irrigation de pâturage (mix avec les boues) ou rejetées dans le milieu naturel.

A **Delhi en Inde** (Projet 6), la station d'Okhla intègre de nombreuses formes de réutilisation : elle fournit en eaux usées traitées des usagers agricoles (37 mm^3/an), industriels (58 mm^3/an), en restitue une part au milieu récepteur et prospecte pour de nouveaux usages.

L'approche holistique de gestion de l'eau mise en œuvre à **Bogota en Colombie** (Projet 11) intègre la REUT. Les EUT dérivées pour les agriculteurs permettent de réduire leurs prélèvements dans la rivière et de maintenir des débits suffisants pour la production hydro-électrique en aval.

En **Lybie** plusieurs expériences de REUT ont été recensées dont la station de **Hadba El Khadra** (Projet 12) où près de 3 000 ha de cultures sont irrigués avec des EUT en sortie de filtration sur sable.

PARTIE 2

COMMENT RENOUVELER LA MANIÈRE D'ABORDER LA RÉUTILISATION AGRICOLE DES EAUX USÉES ?

Cette partie propose une analyse des grandes composantes de l'équation de durabilité d'un projet de réutilisation (Figure 2). Elle développe cinq grandes questions pour structurer des angles d'approches complémentaires du sujet éminemment complexe et multidimensionnel qu'est la réutilisation (Figure 2), et pour accompagner l'élaboration de filières de réutilisation durables avec des risques maîtrisés.

La **filière de réutilisation** est ici définie comme l'ensemble des **processus et des impacts depuis la production d'eaux usées jusqu'à leur devenir final après usage**. Cette notion regroupe l'ensemble des **opérateurs et activités** sur la ressource.

Ces questions ont été identifiées suite au travail de capitalisation de la Partie 1 du rapport, discutées avec le comité de suivi de l'étude, et ajustées ou reformulées pour mieux correspondre à une vision partagée des enjeux et perspectives de la réutilisation pour les pays en développement. Elles sont développées, dans la mesure du possible, selon un plan similaire partant d'un état des lieux pour aboutir aux perspectives et domaines à investiguer (Figure 3), et sont illustrées par des cas et exemples concrets à l'échelle du pays ou du projet.

FIGURE 3 : Structure logique des chapitres - Schéma Ecofilae

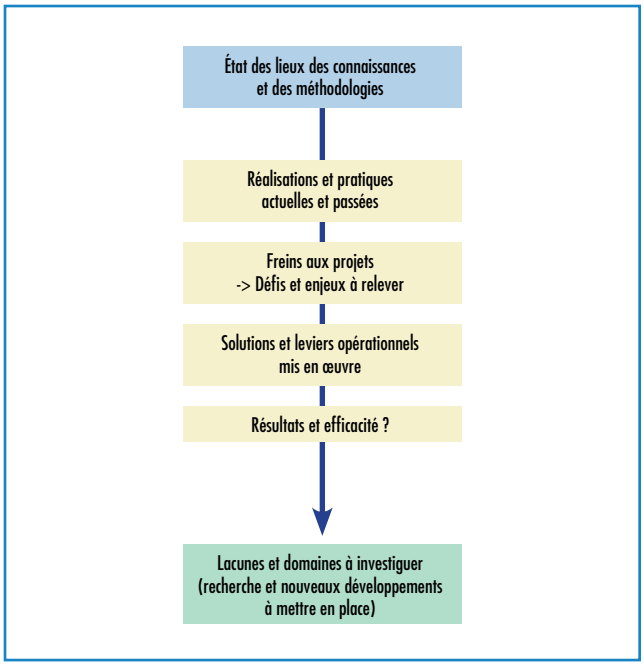
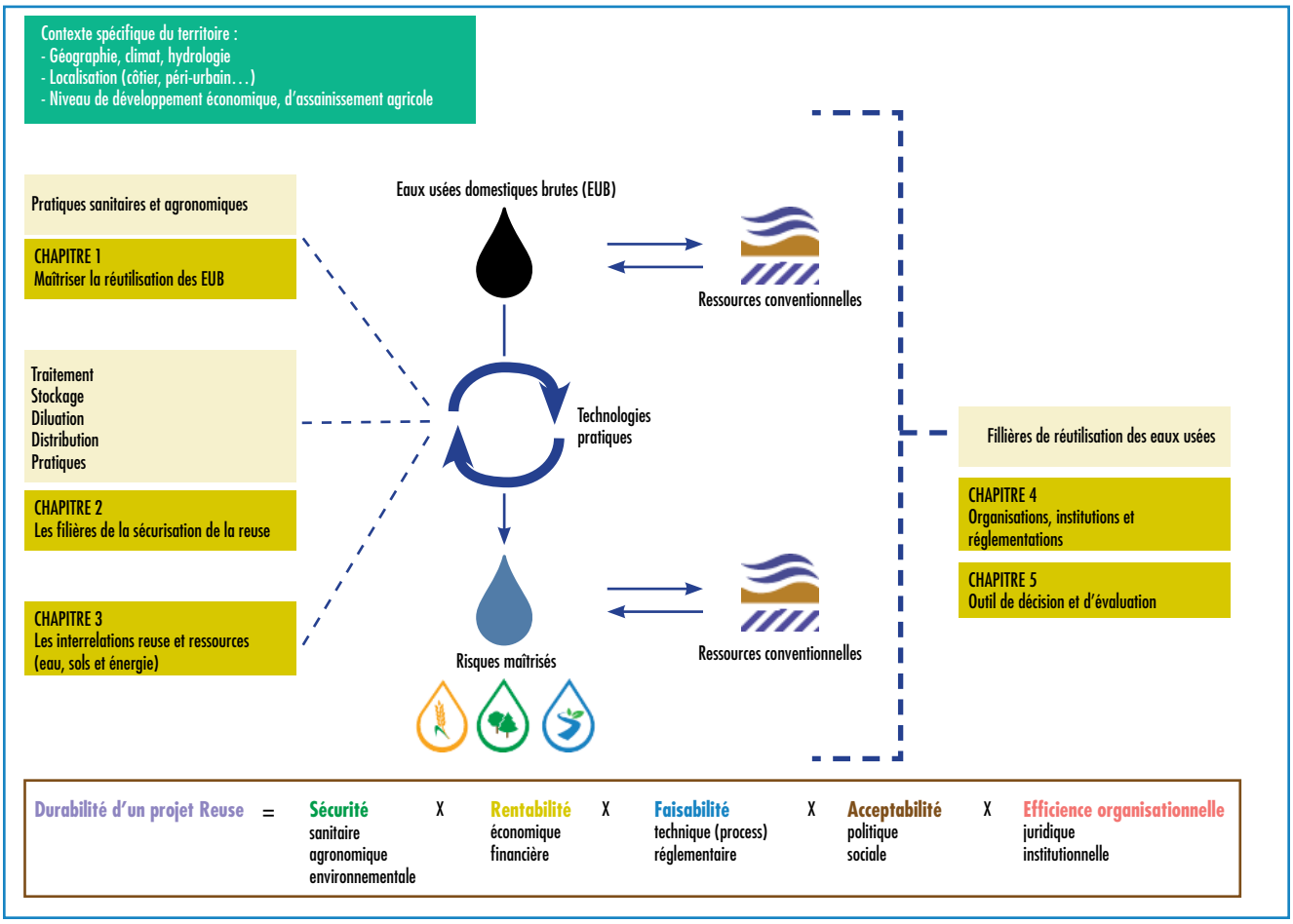


FIGURE 2 : Articulation des chapitres autour de la notion de filière de réutilisation - Schéma Ecofilae



CHAPITRE 1

Réutiliser des eaux usées brutes, faiblement traitées ou diluées, quels leviers pour améliorer les pratiques ?

Qu'elles soient non traitées, faiblement traitées ou mélangées avec l'eau douce, les **eaux usées brutes** sont encore utilisées aujourd'hui, de manière intentionnelle ou non, dans de nombreuses régions du monde.

L'absence d'infrastructure de collecte, de transport et de traitement des eaux usées dans les zones urbaines conduit à des rejets souvent non contrôlés dans les réseaux de drainage et d'évacuation des eaux (canalisations, canaux artificiels, cours d'eau naturel, etc.). Les eaux usées peuvent ainsi constituer une grande partie, voire la totalité, des **écoulements urbains**, en particulier en saison sèche (CGIAR 2012). Les agriculteurs peuvent facilement accéder à cette ressource, dans et hors des villes. Les eaux usées brutes sont **souvent diluées**, mais contiennent encore une teneur élevée en matières fécales. Les **risques sanitaires** sont alors souvent très élevés.
Ainsi l'eau de cours d'eau pollués est probablement la source d'eau d'irrigation de légumes la plus courante dans les milieux urbains et péri-urbains en Afrique (Drechsel 2014). Dans des contextes locaux de disponibilité limitée en fertilisants et en eau « sûre », les eaux usées sont perçues comme un moyen de récupérer la **valeur de l'eau et des nutriments** qu'elles contiennent, souvent gratuitement (Scott 2010).

Le présent chapitre vise ainsi à soulever la question de la manière de **gérer la sécurité** (sanitaire, agronomique et environnementale) **de la REUB tout en considérant et préservant les bénéfices que ces pratiques procurent** (fertilisation, économie, etc.).

Ce chapitre présente dans un premier temps un état de l'art synthétique sur la réutilisation des eaux usées dans le monde (REUB). Il se base sur les nombreuses études et travaux réalisés entre autres par l'IWMI en Afrique de l'Ouest, particulièrement à Accra au Ghana (Projet 1). Les projets de Faisalabad au Pakistan (Projet 2) et le cas du Maroc (Pays 2) permettent également d'illustrer ce chapitre. Dans un second temps l'efficacité des différents leviers utilisés par les autorités locales pour lutter ou faire face à la REUB et aux risques sanitaires, agronomique et environnementaux associés est évaluée.

Le terme « **eaux usées brutes** » (Figure 4), « EUB », sera utilisé pour **toutes les sources d'eau à haute composition en matières fécales, provenant d'eaux usées non traitées (brutes), ou avec de très faibles niveaux de dilution ou de traitement**. Par « faible niveau de dilution ou de traitement » est entendue l'absence d'installations de traitement dédiées. Le stockage, la dilution avec de l'eau douce, et le transport permet toutefois une potentielle réduction des polluants.

LA RÉUTILISATION D'EAUX USÉES BRUTES (REUB) : UNE PRATIQUE COURANTE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

AQUASTATS rapportait en 2012 que 261 millions d'hectares de terres agricoles ont été irriguées dans le monde. Il est approximativement estimé que près de **20 millions d'hectares** l'ont été avec des eaux usées non traitées (ONU, 2003). La superficie des terres irriguées avec des eaux usées non traitées est par ailleurs estimée 10 fois plus grande que celle irriguée avec des eaux usées traitées (Scott 2010).
La FAO a également estimé en 2010 **que 10 % de la population mondiale consommait des cultures produites avec des eaux usées**. Ce chiffre monte jusqu'à 80 % au Viet Nam.

La Figure 5 met en évidence par pays, les surfaces irriguées avec des eaux usées traitées et des eaux usées non traitées. La Chine et l'Inde sont de loin les pays ayant la plus grande superficie de terres irriguées, mais ils sont aussi les principaux utilisateurs des eaux usées brutes non traitées et diluées.

FIGURE 4 : Filière de réutilisation des eaux usées brutes - Schéma Ecofilae

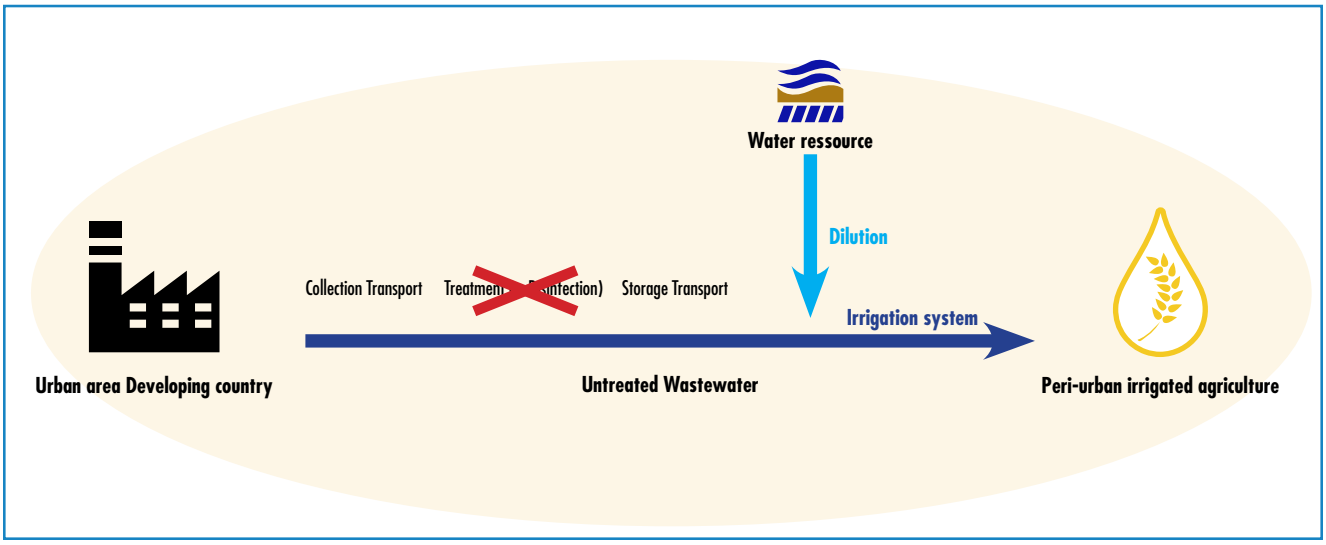
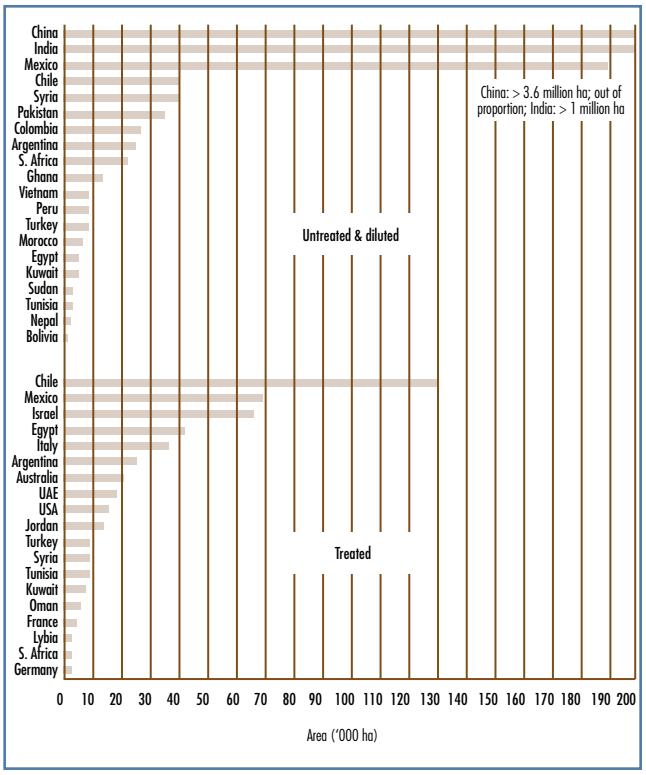


FIGURE 5 : Diagramme des superficies irriguées avec des eaux non traitées ou diluées (haut) et des eaux traitées (bas) (CGIAR 2012)



RISQUES ET BÉNÉFICES LIÉS À L'USAGE D'EAUX USÉES BRUTES POUR L'IRRIGATION

Les eaux usées brutes contiennent des polluants chimiques, mais également une grande variété de différents **agents pathogènes** qui sont capables de survivre sur de longues périodes dans le sol ou à la surface des plantes, et entrent dans la chaîne alimentaire. Les pratiques de réutilisation d'eaux usées brutes sont sources de **risques pour la santé publique, l'environnement et les systèmes agronomiques** (sols et plantes).

Les EUB sont également sources d'éléments **fertilisants** (azote, phosphore et matière organique).

Enjeux sanitaires liés à la présence d'agents pathogènes

Que cela soit par **contact direct** (cutané ou ingestion) avec l'eau et les aérosols issus de l'aspersion, ou indirect via la **consommation des produits agricoles**, les eaux usées brutes sont une source majeure de contamination sanitaire. Elles contiennent en effet divers virus, parasites, bactéries, etc.

Les pratiques de réutilisation ont été et sont encore une des causes principales d'épidémies de diarrhés, de choléra, de typhoïde, et de shigellose, en Afrique et en Asie, avec de nombreuses personnes hospitalisées et de nombreux décès (OMS 2006). Elles sont également un contributeur probable aux infections parasitaires et cutanées.

Les agriculteurs et leurs familles, les populations vivant à proximité de sites d'irrigation à partir d'eaux usées, mais aussi et surtout les consommateurs sont touchés (USEPA 2012).

Enjeux sanitaires et environnementaux liés aux composants chimiques et aux métaux lourds contenus dans les eaux usées industrielles

Les eaux usées brutes dans les zones péri-urbaines ne sont pas seulement d'origine domestique, elles peuvent être mélangées avec les **eaux usées industrielles** (Projet 5 et Projet 6), et, par conséquent, donner lieu à une large gamme de qualité. Les eaux usées brutes sont alors des sources de contaminations sanitaires et des milieux (eaux, sols et plantes).

Les **directives de l'OMS de 2006** fournissent des concentrations maximales tolérables dans les sols en divers produits chimiques toxiques. Elles ont été fixées en évaluant l'exposition humaine à travers la chaîne alimentaire. Ces directives de l'OMS ne traitent pas spécifiquement la façon de réduire les contaminants chimiques dans les eaux usées pour une réutilisation en irrigation. La solution doit néanmoins être recherchée aux niveaux des sources de pollution spécifiques (souvent industrielles).

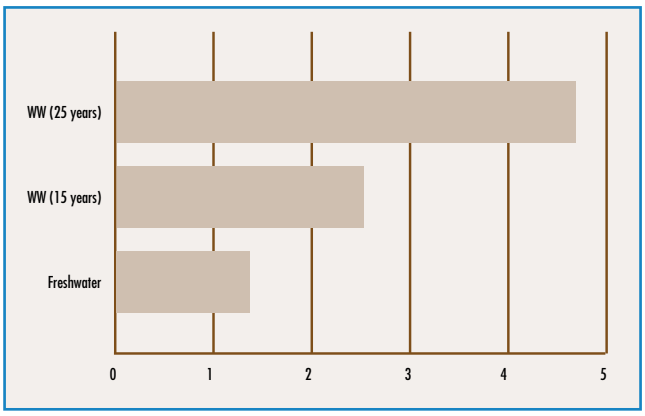
Dans la région de **Settat au Maroc** (Projet 4), avant la mise en œuvre du projet de réutilisation des eaux usées traitées, les études ont évalué la charge en plomb et la prévalence de Giardia intestinalis dans les eaux usées brutes (El Kettani et al, 2010). Les résultats des études sanitaires ont mis en évidence : (1) l'absence d'impacts liés au plomb (maladies, charges anormales …) (2) la prévalence de Giardia intestinalis plus élevée dans les populations utilisant et travaillant au contact d'eaux usées brutes.

La valeur ajoutée agronomique des eaux usées brutes

Les agriculteurs dans les périphéries des villes trouvent dans les eaux usées brutes une ressource **riche en nutriments : azote, phosphore, matière organique**. Une agriculture relativement intensive et diversifiée se développe, les besoins en terres sont réduits, et, par une valorisation optimale de l'eau et des nutriments, les agriculteurs réduisent leur consommation. Les eaux usées brutes sont pour de nombreux agriculteurs la seule source de fertilisation. Les cas d'Accra au Ghana et de Faisalabad au Pakistan viennent illustrer ces phénomènes (Projet 1 et Projet 2).

La présence de matières organiques peut avoir des effets positifs ou négatifs sur les sols en fonction de la nature de la matière organique. Des travaux de l'IWMI (Drechsel 2010) ont mis en évidence que «la matière organique apportée par les eaux usées améliorait la structure des sols, agissait comme un entrepôt de nutriments essentiels pour la croissance

FIGURE 6 : La dynamique de carbone dans le sol sous irrigation avec de l'eau douce (bas), des eaux uses brutes depuis 15 ans (milieu) et depuis 25 ans (haut) en India (Drechsel 2010)



des cultures et améliorait les caractéristiques des sols irrigués (capacité d'échange cationique (CEC)) ». Des études menées en Inde sur les effets à long terme de l'irrigation à partir d'eaux usées sur les propriétés physiques du sol révèlent une augmentation de la stabilité des agrégats, de la capacité de rétention, de la conductivité hydraulique et de la porosité totale. En plus des effets bénéfiques sur la matière organique et sur les paramètres physiques du sol, le taux de carbone organique des sols irrigués avec des eaux usées augmente, quel que soit le sol et les conditions agro-climatiques (Figure 6).

POURQUOI LA RÉUTILISATION D'EAUX USÉES BRUTES EST-ELLE SI COURANTE ET SI RÉPANDUE ?

La construction et l'exploitation d'infrastructures d'assainissement performantes sont difficiles à mettre en œuvre

L'approche de l'OMS (Directives 2006) reconnaît que le traitement conventionnel des eaux usées n'est pas toujours possible, en particulier dans les pays aux ressources limitées. Les infrastructures d'assainissement (collecte, transport et traitement), partie amont de la filière de réutilisation, ne peuvent pas toujours être mises en place pour différentes raisons (**manque de capacités, raisons organisationnelles ou financières**), et, lorsqu'elles sont construites, ne fonctionnent souvent pas efficacement. L'explosion démographique en milieu urbain, dans de nombreux cas, surpasse de loin les capacités des infrastructures rapidement en surcharge (par exemple Beit Lahia WWTP en Palestine - Projet 9).

Dans ces cas, les stratégies alternatives pour limiter les risques liés à la REUB doivent être évaluées et appliquées pour engager une transition vers des systèmes planifiés, contrôlés et sécurisés.

Les eaux usées brutes assurent la subsistance de nombreux urbains et péri-urbains

La REUB en agriculture est souvent **officiellement interdite** mais largement pratiquée et officieusement tolérée.

En effet, **toute une économie urbaine et périurbaine** repose sur l'agriculture périurbaine et donc sur la réutilisation des eaux usées, là où les autres ressources en eau ne sont pas disponibles (eaux usées traitées, eaux de surface et souterraine) (CGIAR 2012) et ou aucune autre alternative adaptée n'est proposée. L'ensemble de la filière alimentaire est dépendante et impactée, depuis l'agriculteur qui accède à une ressource en eau souvent gratuite, jusqu'au consommateur en passant par les petits revendeurs. Maintenir ces filières est donc indispensable pour le maintien d'emplois et de revenus et l'amélioration des régimes alimentaires (légumes et fruits diversifiés) et de la sécurité alimentaire générale.

COMMENT ABORDER CETTE RÉUTILISATION D'EAUX USÉES BRUTES ?

L'interdiction, un moyen peu efficace

Les États et les organismes chargés d'appliquer une loi interdisant la REUB sont souvent **dépassés par les pratiques** qu'ils ne peuvent pas ou qu'ils ne souhaitent pas contrôler car ils en connaissent l'importance économique.

Il en résulte souvent des pratiques non contrôlées, et il est alors très difficile pour les autorités de mettre en œuvre des actions pour limiter les risques, ces pratiques n'entrant pas dans le débat car officiellement interdites.

Pour éliminer efficacement la REUB en l'interdisant, les pays doivent être en mesure de fournir aux agriculteurs **des alternatives plus sûres, plus rentables et plus durables.** Le Maroc entreprend ce chemin, de grands volumes d'eaux usées brutes sont encore utilisés en irrigation (70 mm^3), mais de nombreux projets de stations d'épuration associent la valorisation des eaux usées traitées (Pays 2 et Projet 4).

La dilution, une solution qui peut être contrôlée

Les EUB en milieu urbain sont souvent rejetées et récupérées dans des canaux ou cours d'eau de drainage où elles se mélangent avec l'eau des cours d'eau et avec les eaux pluviales. Si la dilution est assez forte (forte variabilité saisonnière suivant les régions) les risques peuvent être réduits, et la réutilisation se fait alors de manière indirecte. La REUB et la dilution associée doivent néanmoins être contrôlées. Le CGIAR estime même que dans certains pays, un traitement à faible coût des eaux usées domestiques peut résulter en de l'eau de qualité inférieure à celle des eaux usées non traitées diluées dans des canaux ou des cours d'eau (CGIAR 2012).

En **Égypte** (Pays 4), les eaux usées domestiques non traitées sont souvent rejetées dans le Nil, son delta ou dans les canaux de drainage. Cette pratique est responsable des niveaux élevés de contaminations bactériennes. Mélangées et diluées avec de l'eau douce, elles sont réutilisées en aval pour l'irrigation (riz, blé, etc.) ou l'aquaculture. Une partie de ces eaux est parfois traitée de manière naturelle en traversant des zones humides avant réutilisation (exemple du lac Manzala).

La promotion des bonnes pratiques pour réduire les risques à différents niveaux : l'approche multi-barrières de l'OMS 2006

L'**approche multi-barrières de l'OMS** provient de la conclusion que la réutilisation conventionnelle (avec des eaux usées traitées) est impossible dans les pays à faibles revenus où un faible pourcentage des eaux usées produites est effectivement traité. **Des mesures, autres que le traitement préalable, pour réduire les risques liés à la REUB existent.** Les risques peuvent donc ainsi être contrôlés et la réutilisation pilotée. Ces mesures devraient, dans certains cas, être d'avantage promues et mises en œuvre par les organismes de gestion et de contrôle (CGIAR 2012).

Les recommandations de l'OMS (2006) pour les eaux usées brutes ciblent des alternatives, localement réalisables grâce à un ensemble de mesures de réduction des risques de contamination, **à tout point de la filière entre la production des eaux usées et la consommation d'aliments contaminés**. Parmi les efforts sur la gestion des eaux usées, le traitement reste néanmoins la principale mesure d'abaissement du risque sanitaire.

Ce cadre d'évaluation des risques identifie et distingue les communautés vulnérables (les travailleurs agricoles, les membres des communautés où l'agriculture est irriguée avec des eaux usées et les consommateurs) et considère les compromis entre les risques potentiels et les avantages nutritionnels (CGIAR 2012).

L'approche multi-barrières de l'OMS

Cette approche spécifique vise à :

- définir un taux maximal tolérable de maladies supplémentaires ;
- en déduire les risques acceptables de maladies et d'infections ;
- déterminer les réductions de pathogènes nécessaires pour s'assurer que les risques acceptables de maladies et d'infections ne soient pas dépassés ;
- déterminer comment les réductions des pathogènes requises peuvent être obtenues ;
- mettre en place un système de suivi des contrôles.

La figure et le tableau ci-dessous présentent une vue d'ensemble des mesures de protection de la santé, qui relèvent, sont en marge ou font suite au traitement le long de la filière de réutilisation agricole des eaux usées. Une réduction globale des risques est mieux réalisée lorsque ces mesures sont combinées, c'est-à-dire dans une approche à barrières multiples. Des campagnes de sensibilisation sur le risque invisible des agents pathogènes doivent accompagner la promotion de ces pratiques.

Cette approche par étapes donne aux gestionnaires locaux une souplesse pour prendre en main les risques d'irrigation avec des eaux usées, leur fournit des options viables localement et combinables, à la différence d'une approche par seuils de niveaux qualité comme seule option réglementaire.

Les mesures d'atténuation des risques sur et hors de l'exploitation agricole sont généralement moins chères et plus rentables qu'un traitement conventionnel des eaux usées, et donc bien adaptées aux contextes à ressources limitées. Les mesures de sécurité qui nécessitent une infrastructure sur l'exploitation peuvent toutefois exiger une sécurisation foncière dont nombre d'agriculteurs urbains ne disposent pas. La recommandation de protection de la santé la plus efficace est de veiller à ce que les cultures produites ne soient pas consommées crues. Toutefois, cette option nécessite une capacité de surveillance appropriée et des alternatives de cultures qui soient viables pour les agriculteurs (CGIAR 2012).

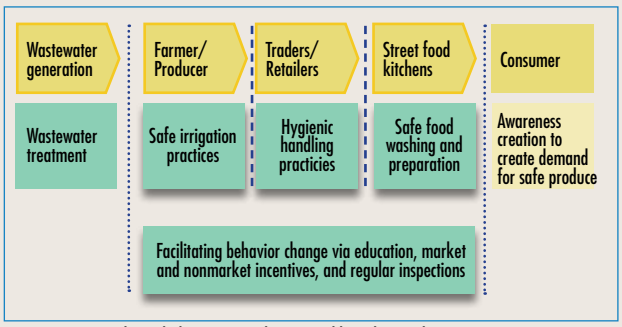


FIGURE 7 : L'approche multi-barrière pour la santé publique lorsque le traitement des eaux usées est limité – OMS 2006

Lorsque c'est possible, les mesures suivantes contribuent à atténuer les risques de contamination :

- ne pas irriguer des cultures de produits consommés crus ;
- installer des systèmes de stockage et de traitement à la ferme ;
- convertir à l'irrigation localisée ;
- porter des vêtements de protection et des gants (agriculteurs) ;
- laver, stocker et la cuire les produits avant de les consommer ;

Ces mesures sont reprises et complétées dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU 2 : Mesures non-conventionnelles de contrôle et de protection sanitaire et réductions associées en pathogènes – OMS 2006

CONTROL MEASURE	PATHOGEN REDUCTION (log units)	NOTES
A.Wastewater treatment	6-7	Reduction of pathogens depends on type and degree of treatment selected.
B. On-farm options		
Crop restriction (i.e., no food crops eaten uncooked)	6-7	Depends on (a) effectiveness of local enforcement of crop restriction, and (b) comparative profit margin of the alternative crop(s).
On-farm water treatment:		
(a) Three-tank system	1-2	One pond is being filled by the farmer, one is settling and the settled water from the third is being used for irrigation.
(b) Simple sedimentation	0.5-1	Sedimentation for ~18 hours.
(c) Simple filtration	1-3	Value depends on filtration system used.
Method of wastewater application:		
(a) Furrow irrigation	1-2	Crop density and yield may be reduced.
(b) Low-cost drip irrigation	2-4	Reduction of 2 log units for low-growing crops, and reduction of 4-log units for high-growing crops.
(c) Reduction of splashing	1-2	Farmers trained to reduce splashing when watering cans used (splashing adds contaminated soil particles on to crop sufaces which can be minimized).
Pathogen die-off (cessation)	0.5-2 per day	Die-off between last irrigation and harvest (value depends on climate, crop type. etc).
c. Post-harvest options at local markets		
Overnight storage in baskets	0.5-1	Selling produce after overnight storage in baskets (rather than overnight storage in sacks or selling fresh produce without ovennight storage).
Produce preparation prior to sale	1-2	a) Washing salad crops, vegetables and fruits with clean water.
	2-3	(b) Washing salad crops, vegetables and fruits with running tap water.
	1-3	(c) Removing the outer leaves on cabbages, lettuce, etc.
D. In-kitchen produce-preparation options		
Produce disinfection	2-3	Washing salad crops, vegetables and fruits with an appropriate disinfectant solution and rinsing with clean water.
Produce peeling	2	Fruits, root crops.
Produce cooking	5-7	Option depends on local diet and preference for cooked food.

Sources : Amoah et al. (2011).

Le **District Thanh Tri à Hanoi au Viet Nam** est un bon exemple de l'efficacité de la mise en œuvre d'**une approche multi-barrières** : des zones humides aérées ont été construites pour traiter de manière très sommaire les eaux usées brutes. Elles sont ensuite utilisées par les agriculteurs qui mettent en œuvre des pratiques adaptées (porter des gants et des bottes) et par les consommateurs. Les assolements ont également été adaptés à la qualité des eaux, transitant de la riziculture vers l'aquaculture et la production de légumes aquatiques.

La transition progressive vers la REUT planifiée et contrôlée

Le traitement des eaux usées reste le premier facteur abaissant les risques de contamination dans la filière de réutilisation des eaux usées. **Se diriger vers une réutilisation planifiée, contrôlée, centralisée ou décentralisée reste la solution considérée la plus sûre**, d'atteindre le plus haut niveau sanitaire. Lorsque les capacités opérationnelles et financières s'améliorent, la transition devient nécessaire, tout en établissant des protocoles de réglementations et de surveillance. Le processus peut s'étendre sur de nombreuses années en fonction du niveau du pays (CGIAR 2012).

PERSPECTIVES POUR DES DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Le risque sanitaire, défini par la rencontre de la menace (la qualité de l'eau en termes de contaminants) et de la vulnérabilité (l'exposition humaine), est trop élevé dans les cas de réutilisation non contrôlée et non surveillée des eaux usées brutes. Les avantages économiques et agronomiques qu'elle procure ne peuvent pas les contre balancer : **des systèmes contrôlés et surveillés sont indispensables.**

Comme expliqué plus haut, le traitement est la première mesure limitant les risques dans la filière de réutilisation, mais il ne doit cependant pas être considéré comme une solution unique et suffisante. Il existe d'autres barrières moins coûteuses et plus faciles à mettre en place qui réduisent les contaminants (la menace), telle que le stockage des eaux usées, ou qui réduisent l'exposition (la vulnérabilité). Par ailleurs les systèmes de traitement réduisent les charges en pathogènes, mais ils diminuent également fortement la matière organique et les concentrations en nutriments.

La recherche sur les technologies de traitement (même les technologies à faible coût et pour des systèmes décentralisés) devrait donc se concentrer sur des systèmes capables de **réduire les charges en pathogènes tout en maintenant le potentiel agronomique** des eaux usées. La réduction des risques (agents pathogènes et autres polluants) liés au système agronomique (sols et cultures), mais également au transport, aux systèmes de stockage et d'irrigation, doivent être mieux compris et caractérisés. Les solutions avec le meilleur rapport coût-efficacité doivent être considérées.

Les étapes basiques de traitement (stockage, zones humides, etc.) auxquelles s'ajoutent des mesures de limitation de l'exposition sont-elles suffisantes pour maîtriser le risque sanitaire ? Davantage d'évaluations de ces types de projets sont nécessaires et de nouveaux pilotes devraient être mis en œuvre.

Egypte - Pompage agricole dans le Delta du Nil © Condom, 2015

CHAPITRE 2

Quelles filières de traitement sont adaptées pour sécuriser les projets de réutilisation des eaux usées ?

La **filière de réutilisation des eaux usées traitées** (Figure 8) se compose d'une succession d'étapes et de processus qui interviennent depuis la production des eaux usées brutes, jusqu'à l'usage final de ces eaux sur des cultures irriguées, incluant les dimensions technologiques (collecte et réseau de transport des eaux usées brutes, technologies de traitement, systèmes de stockage et de distribution, techniques d'irrigation), mais également pratiques mises en œuvre (pratiques agronomiques et gestion de l'environnement).

Dans les pays en développement, les systèmes de traitement des eaux usées ont initialement été construits et conçus dans des objectifs de protection sanitaire et environnementale. La REUT était, jusqu'à il y a peu, rarement prise en compte. Les intérêts et motivations pour la construction d'une station d'épuration peuvent désormais être renforcés par la perspective de réutiliser les eaux usées traitées, notamment pour l'irrigation, leur donnant ainsi une valeur économique (Barcelo 2010).

Ce chapitre fait un centrage sur les **procédés de traitement mis en œuvre et adaptés aux pays en développement** (à revenus moyens et faibles) **pour la réutilisation des eaux usées traitées**. Différentes options techniques de traitement sont possibles, et une large gamme de filières de réutilisation en résultent depuis des eaux traitées sommairement, jusqu'à des filières à haute technicité (Figure 9). Les retours d'expériences (**Synthèses pays** et **Synthèses projets**) illustrent schématiquement différentes filières, de la source des eaux usées jusqu'à l'usage agricole, et permettent de discuter de la pertinence des choix techniques (lorsque disponible dans la littérature), en particulier du traitement, au regard des contextes locaux spécifiques.

Le terme « **eaux usées traitées** » « EUT », sera ici utilisé **pour toutes les sources d'eaux usées d'origines urbaines, industrielles ou agricoles ayant subi un processus de traitement plus ou moins poussé en vue d'une sécurisation et d'une limitation des risque liés à leur réutilisation.**

QUELS PROBLÈMES RELATIFS AU TRAITEMENT LES PROJETS DE RÉUTILISATION DES EAUX USÉES POSENT-ILS ?

Dans les pays en développement et en particulier dans la région méditerranéenne les obstacles majeurs à une réutilisation durable des eaux usées concernant le traitement sont :

- Le **dysfonctionnement** des technologies mises en œuvre ;
- une **efficacité insuffisante** dans l'épuration pour atteindre la qualité de l'eau requise à la réutilisation ;
- une **perte de contrôle dans la qualité de l'eau sur tout le processus**, depuis l'entrée dans le système d'épuration jusqu'à son usage final.

Le dysfonctionnement du processus d'épuration est un obstacle majeur. Les stations d'épuration souvent ne fonctionnent pas correctement en raison du manque de ressources, de pièces de rechange pour l'entretien, d'incitations et / ou de compétences du personnel, ou bien encore en raison de surcharge ou sous-charge de la station.

Au-delà des raisons d'organisation ou de conception, **le choix même de la technologie de traitement** peut être remis en question. Dans des conditions où **l'énergie et les capacités sont limitées**, les pays en développement devraient privilégier des technologies à **faible coût**, à **faible niveau de technicité** et à **faible consommation en énergie**.

Dans certains pays, le panel des technologies proposées aux ingénieurs et aux décideurs est souvent restreint à une gamme étroite promue par des organisations institutionnelles : par exemple les boues activées, les filtres percolateurs ou les systèmes de lagunes (au Maroc). Les autorités manquent souvent d'informations et de compétences techniques sur la vaste gamme existante de technologies (Barcelo 2010).

A Faisalabad au Pakistan (Projet 2) le choix du système de lagunes et leur dimensionnement peuvent être remis en question pour expliquer les faibles niveaux de qualité des EUT.

FIGURE 8 : Filière de réutilisation des eaux usées traitées - Schéma Ecofilae

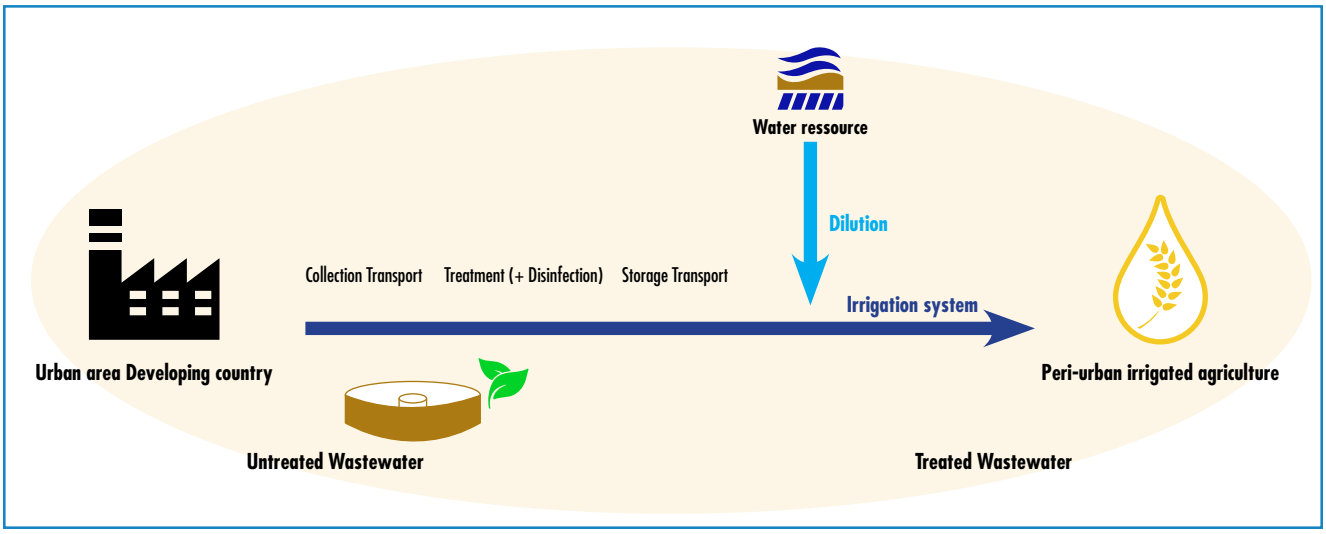
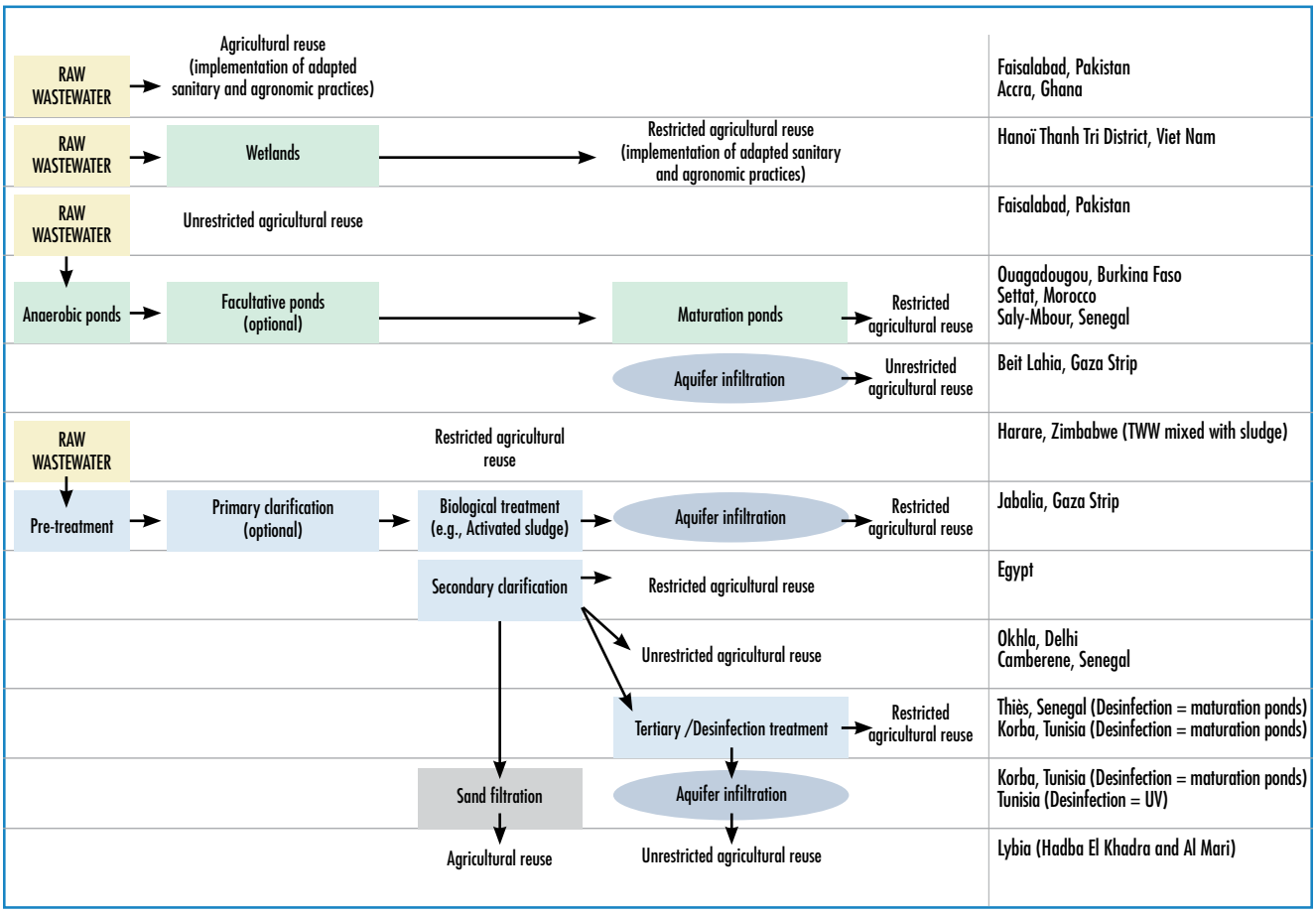


FIGURE 9 : Solutions de traitement mises en place dans certains pays en développement - Schéma Ecofilae



COMMENT CHOISIR LE PROCESSUS D'ÉPURATION LE MIEUX ADAPTÉ À SON CONTEXTE ?

Le choix de la meilleure technologie disponible n'est pas un processus facile : il exige une évaluation technique et des comparaisons (approche bottom-up, depuis l'usage vers le choix de la source et du traitement). Il doit être raisonné en fonction de critères bien établis comprenant :

- Les possibilités de réutilisation (y-a-t-il vraiment une demande pour des eaux usées traitées ?) ;
- La disponibilité et le coût des terres (si les terres sont peu couteuses, alors des lagunes en anaérobie sont une option) ;
- La qualité requise de l'effluent sortant (en fonction des réglementations locales, des types de cultures irriguées, des pratiques sanitaires et agronomiques dans la chaîne de production) ;
- La taille de la collectivité (grande ou moyenne zone urbaine, zone rurale) ;
- La qualité des eaux usées entrantes (d'origine domestique seulement ? quelle concentration ? dilution avec eaux pluviales ? rejets industriels ?) ;
- L'emplacement de la station d'épuration (dans le voisinage des zones irriguées ? dans une zone avec risque environnemental élevé ?) ;
- Les conditions économiques et techniques (le projet sera-t-il techniquement et économiquement durable dans le temps ?).

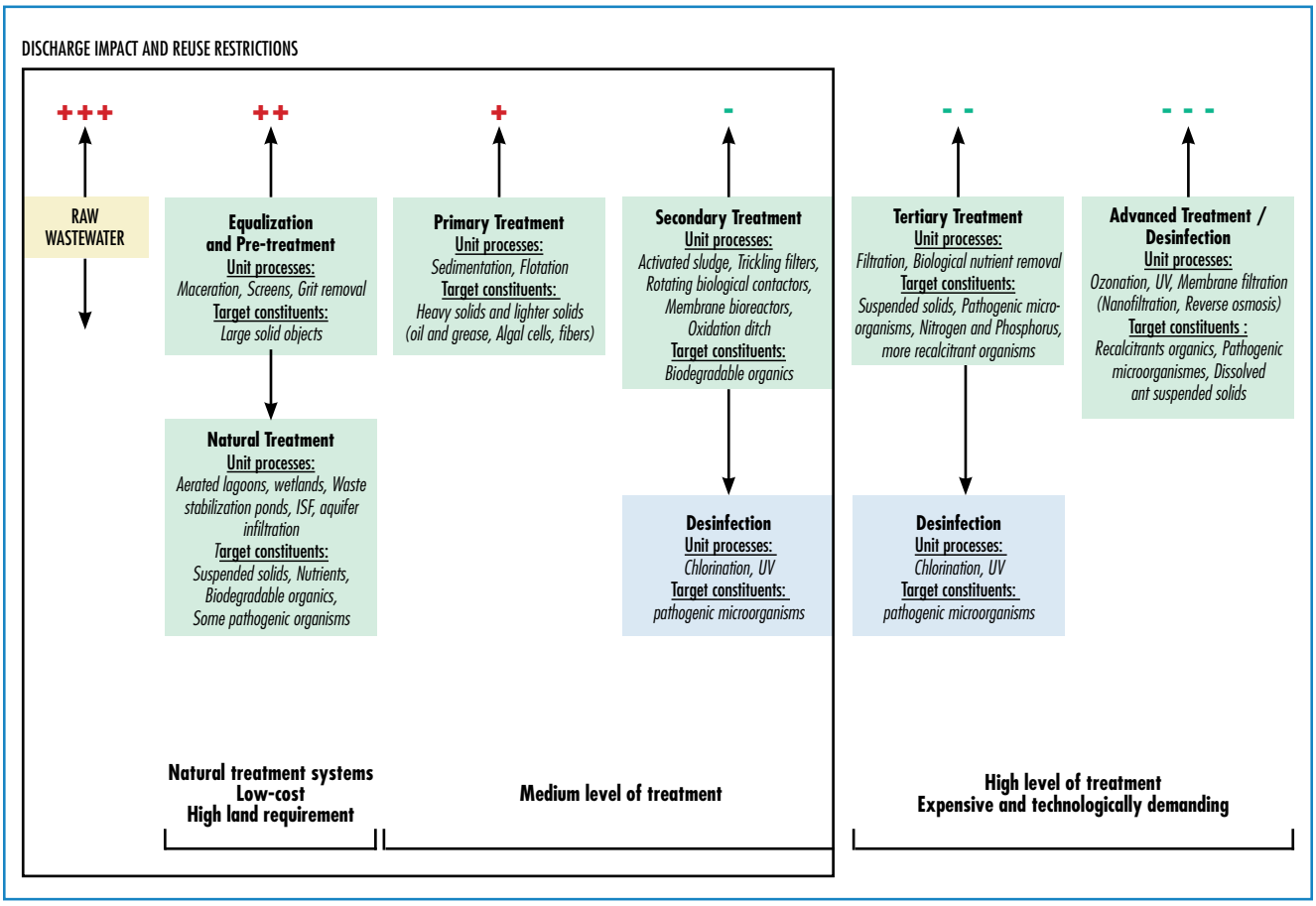
Les communautés urbaines et rurales dans les zones intéressées par la présente étude ont plusieurs caractéristiques en commun, qui guident la conception et le choix des technologies de traitement (Barcelo 2010) :

- la nécessité d'un stockage saisonnier pour les eaux usées avant la saison d'irrigation (la production des eaux usées est continue, tandis que la demande en eau d'irrigation est périodique et saisonnière) ;
- en général, il y a suffisamment de terres peu onéreuses à proximité de la communauté urbaine ;
- l'ensoleillement est généralement abondant dans ces régions, ce qui donne l'avantage aux processus photosynthétiques ou autres processus dépendant de l'énergie solaire ;
- les eaux usées sont relativement concentrées en raison des faibles taux de consommation en eau par habitant ;
- les eaux usées ont une relativement haute pathogénicité en raison de l'endémicité de certaines maladies et de la présence élevée de vecteurs ;
- le manque de capitaux ;
- l'absence, la pénurie ou le manque de fiabilité du service de fourniture de l'énergie électrique ;
- la nécessité d'avoir des installations minimales, simples et peu coûteuses en exploitation et en maintenance.

QUELLES SONT LES TECHNOLOGIES D'ÉPURATION DISPONIBLES?

Le traitement des eaux usées se compose généralement d'une série de processus unitaires physiques, chimiques, biologiques qui peuvent chacun éliminer spécifiquement des composants des eaux usées (Figure 10). Différentes combinaisons de processus unitaires sont donc possibles (Sanghi 2013). Les

FIGURE 10 : Les procédés de traitement des eaux usées pour leur réutilisation - Schéma Ecofilae & adaptation de Sharma and Sanghi, 2013



technologies de traitement standards sont principalement orientées vers les paramètres organiques et d'hygiène. Les polluants comme l'azote et le phosphore étant valorisés par l'irrigation, il n'y a pas de nécessité d'avoir une grande efficacité de réduction (Barcelo 2010). Habituellement les eaux usées ne contiennent pas de métaux lourds (sauf si les eaux usées domestiques sont mélangées à des effluents industriels), ce qui signifie que la principale préoccupation vis-à-vis des risques pour la santé concerne les pathogènes. La salinité des eaux usées est également une préoccupation majeure pour les risques environnementaux et agronomiques (Choukr'Allah 2010).

Le pré-traitement

Le prétraitement est une étape essentielle à l'amont de tout système de traitement (dégrillage, dessablage, tamisage et traitement des graisses). Il consiste à éliminer tous les matériaux qui peuvent être facilement récupérés dans les eaux usées brutes (détritus, feuilles, branches, graviers, sables et autres gros objets) avant qu'ils endommagent les pompes ou les lignes de traitement qui suivent.

A Faisalabad au Pakistan (Projet 2) les grilles, non mises en place dans un premier temps dans le canal d'entrée des eaux usées, ont permis de limiter la prolifération de végétaux et de moustiques.

Les technologies d'épuration à haute technicité et à coûts élevés

Les options d'épuration ci-dessous (traitements primaires et secondaires) sont souvent plus adaptées pour l'élimination des polluants environnementaux que pour les agents pathogènes. Beaucoup de ces procédés peuvent aussi être complexes et coûteux en exploitation dans les pays en développement.

Le traitement primaire permet la sédimentation par gravité des matières solides lourdes ou la mise en suspension des solides légers. Des coagulants et floculants chimiques peuvent être utilisés avant la sédimentation / flottation pour améliorer la séparation solide-liquide. Le traitement primaire est généralement insuffisant pour éliminer les virus, les bactéries et les métaux (Sanghi 2013).

Lorsque les effluents primaires sont utilisés pour l'irrigation des cultures ou pour l'aquaculture, des mesures de protection supplémentaires sont nécessaires : restreindre les cultures irriguées, utiliser des équipements de protection individuelle, laver et cuire les aliments, faire un suivi régulier des accumulations chimiques et toxiques dans les sols et les produits alimentaires.

Le traitement secondaire consiste en une combinaison de traitements biologiques et de clarifications. Une grande variété de procédés existes. Ils comprennent (Valentina Lazarova 2004) :

- les systèmes de boues activées ; dans les pays développés, cette étape intermédiaire est suivie par d'autres procédés de traitement complémentaires ;
- les filtres percolateurs ; facile d'exploitation et à faibles coûts, ce processus a une efficacité de traitement limitée et une forte dépendance au carbone et aux charges hydrauliques, et est très sensible à la température. Ces derniers paramètres sont très limitants pour la mise en œuvre de tels systèmes dans les pays en développement.

Lorsque le traitement secondaire est combiné avec une désinfection adéquate, les eaux usées traitées secondaires peuvent être considérées comme sûres pour les cultures d'irrigation. Toutefois, certaines restrictions sont proposées lorsque les eaux usées traitées sont appliquées avec des systèmes d'irrigation par aspersion ou lorsque l'irrigation concerne des cultures dont les produits ne subissent pas de transformation (Sanghi 2013).

A Harare au Zimbabwe (Projet 10) un lit bactérien dédié est utilisé en parallèle d'un procédé à boues activées pour traiter les eaux usées traitées réutilisées pour l'irrigation de fourrage. Les eaux usées traitées réutilisées sont mélangées avec les boues issues des deux processus. Un mélange à 3 à 4% de matières solides est obtenu.

Les systèmes à boues activées sont souvent coûteux, les coûts d'exploitation et d'entretien sont difficilement recouverts et constituent les principaux obstacles à la mise en œuvre de ces systèmes de traitement à haut niveau technologique dans les pays en développement (Kampa 2010).

L'élimination des boues primaires et secondaires est également nécessaire pour prévenir la propagation d'agents pathogènes et d'autres contaminants dans les sols et les cours d'eau (Sanghi 2013). La gestion des boues peut devenir problématique (Pays 3).

La **désinfection** peut être réalisée après un traitement secondaire à l'aide de chlore libre, soit sous forme de chlore gazeux ou d'hypochlorite de sodium ou de calcium. L'efficacité du chlore vis à vis de l'inactivation des bactéries est très bien connue. Le chlore est également relativement efficace vis-à-vis des virus (jusqu'à 3 log de réduction), mais il est moins efficace vis-à-vis des œufs d'helminthes (réduction inférieure à 1 log).

En plus de chlore libre, du dioxyde de chlore et les UV sont également utilisés comme désinfectants primaires pour le traitement des eaux usées et pour la réutilisation agricole. Ils sont généralement plus efficaces vis-à-vis de l'inactivation des virus et des protozoaires que le chlore libre. La chloramine, un désinfectant moins puissant, est utilisée dans un deuxième temps dans le système de distribution de l'eau épurée (Sanghi 2013).

Pour des raisons économiques, la combinaison de chlore et d'UV est largement utilisée dans les projets de réutilisation des eaux usées dans les pays développés, mais plus rarement dans les pays en développement (Asano 2008).
L'élimination des polluants organiques dans les processus de traitement est nécessaire dans la filière de réutilisation des eaux usées afin de réduire le potentiel de prolifération secondaire des agents pathogènes dans les systèmes de distribution et garantir une désinfection efficace (Valentina Lazarova 2004).

Les technologies d'épuration à basse technicité et à bas coûts

Les technologies de **traitement naturel extensif**, également appelé système de traitement à **bas niveau de technicité** (low tech), peuvent être utilisées dans les zones subtropicales où s'alternent saisons sèches et saisons humides et où les températures moyennes sont supérieures à 20°C (Valentina Lazarova 2004). En utilisant des procédés de sédimentation, de dégradation biologique, et la désinfection naturelle (sol ou UV), elles présentent généralement une bonne efficacité, sont fiables dans leur performance de traitement, abordables dans leur construction et ont des exigences réduites en termes d'énergie et de maintenance (Sanghi 2013).

Les systèmes de lagunage

Les systèmes de lagunage forment une série de lagunes peu profondes reliés entre eux. Ils sont conçus pour utiliser les processus naturels de **biodégradation**, **de désinfection** par la lumière du soleil, et **de sédimentation** des particules par gravité, pour purifier l'eau. Des taux de charge très élevés peuvent être appliqués (10 à 20 fois plus élevé que dans le traitement classique par boues activées) (Choukr'Allah 2010).

Le principe de fonctionnement se base sur la dégradation de la matière organique par des bactéries et la photosynthèse d'algues (Figure 11).

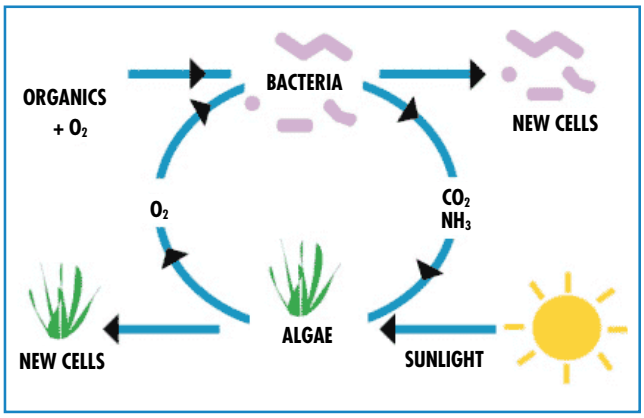


FIGURE 11 : Mécanismes naturels mis en œuvre lors du lagunage - UNEP

Lorsqu'elles sont bien conçues et exploitées correctement, elles sont très efficaces pour éliminer les agents pathogènes et peuvent fonctionner à faible coût. Les agents pathogènes sont progressivement éliminés le long de la série de lagunes, l'élimination maximale a lieu dans le bassin de maturation (la dernière lagune dans la série). Cependant les lagunes doivent être conçues, utilisées et entretenues de façon à empêcher la reproduction des vecteurs de maladies dans les lagunes.

Néanmoins, elles perdent leurs avantages économiques comparatifs par rapport aux systèmes de traitement mécanisés dès lors que les prix des terrains sont élevés.

Projet de traitement des eaux usées par lagunage pour la réutilisation agricole à Tizi n'Oucheg (Haut Atlas – Maroc) - MediaVentures

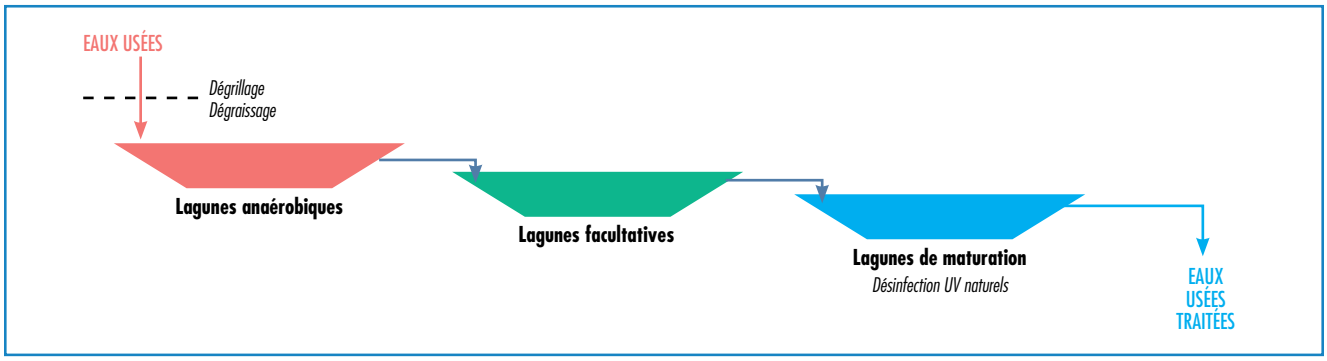


FIGURE 12 : Exemple schématique de filière de traitement par lagunage - Schéma Ecofilae

Différents types de lagunes peuvent être utilisés en série ou en parallèle (Valentina Lazarova 2004) & (Choukr'Allah 2010)

- Les bassins anaérobies sont utilisés comme étape de pré-traitement (bassins avec une grande profondeur et une longue durée de séjour) ;
- les lagunes facultatives (ou bassins d'oxydation) sont utilisés pour l'élimination du carbone (conditions anaérobies près du fond et conditions aérobies à la surface) ;
- les lagunes aérées via des aérateurs mécaniques flottants permettent l'élimination du carbone à des taux plus élevés que les bassins facultatifs. Ils sont souvent utilisés dans les pays à revenus élevés (France) et plus rarement dans les pays à faibles revenus (mais existent au Maroc) ;
- les bassins de maturation sont des systèmes relativement peu profonds utilisés comme une étape de désinfection. Ils sont souvent utilisés dans les filières de réutilisation de l'eau en combinaison avec d'autres lagunes en série, ou dans des systèmes de traitement biologique intensif (Tunisie et Maroc). Cette technologie élimine efficacement les œufs d'helminthes et assure la désinfection des eaux usées par l'action directe de la lumière (UV). Néanmoins en cas d'irrigation non restrictive, les performances peuvent s'avérer insuffisantes. Ces bassins peuvent par ailleurs aussi jouer le rôle de réservoirs de stockage.

Les conditions anaérobies conduisent à des conversions contrôlées de polluants organiques en dioxyde de carbone et en méthane, ce dernier pouvant être utilisé comme source d'énergie (pas d'illustration dans la présente étude).

Le lagunage est actuellement considéré comme une méthode de premier choix pour le traitement des eaux usées dans les régions chaudes (Moyen-Orient, Afrique, Asie). Cette technologie est recommandée au Maroc (Pays 2) et en Tunisie pour les villes entre 2 000 et 5 000 habitants.

Les principaux inconvénients de ces systèmes de lagunes sont :

- une certaine rigidité dans l'exploitation, en particulier en ce qui concerne les débits, et les variations saisonnières (risques de surcharge) ;
- La sensibilité à l'évaporation, en particulier pour les zones sèches et venteuses (Projet 2) ;
- La sensibilité à la turbidité de l'eau provoquée par le développement des plantes et d'algues ;
- L'efficacité limitée du système vis-à-vis des matériaux toxiques (domestiques ou d'origine industrielle).

A Nairobi au Kenya, l'un des plus grands systèmes d'épuration par lagunage d'Afrique traite par temps sec un débit de 80 000 m^3/jour (capacité maximale de 240 000 m^3/jour).

Le traitement comprend 8 séries de bassins en parallèle, dont une lagune facultative primaire suivie d'une séquence de 3 lagunes de maturation. La qualité de l'effluent est conforme aux directives de l'OMS pour l'irrigation sans restriction.

Les zones humides artificielles

Les zones humides artificielles (Choukr'Allah 2010) (Sanghi 2013) visent à imiter les propriétés des zones humides naturelles dans un environnement piloté et contrôlé. Le système utilise des processus naturels impliquant la végétation, le sol et leurs assemblages microbiens associés pour épurer les eaux usées.

Elles sont efficaces dans l'abattement de la demande biologique en oxygène (DBO), des solides en suspension (MES) et de l'azote. Elles ont des besoins très limités en exploitation (faible consommation énergétique) et maintenance.

Deux types de zones humides artificielles (Figure 13) se distinguent :

- les zones humides de type « Subsurface Flow System » (SFS), où l'eau s'écoule sous la surface. Elles sont bordées de fossés qui ont été remplis de graviers, de sables ou de substrats du sol et plantées avec des variétés végétales appropriées. Le traitement est efficace lorsque les eaux usées sont en contact avec les racines des plantes, le sol ou le substrat. Les roseaux sont couramment utilisés ;
- les zones humides de type « Free Water Surface » (FWS), où l'eau s'écoule en surface. Ce sont des canaux peu profonds ou des bassins à surface libre avec une végétation qui émerge. Les deux macrophytes aquatiques flottantes couramment utilisées sont la jacinthe d'eau et les lentilles d'eau. La faible profondeur, la faible vitesse d'écoulement, et la présence de tiges de plantes et de litière régulent le débit d'eau. Le traitement est efficace lorsque le flux d'eau passe lentement entre les tiges et les racines des végétaux.

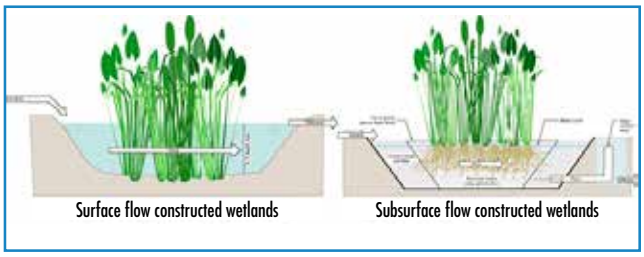


FIGURE 13 : Deux systèmes de zones humides artificielles pour épurer les eaux usées - Schéma Ecofilae

Les odeurs et les moustiques sont une préoccupation majeure de ces systèmes de zones humides. Les zones humides de type FWS en particulier ne doivent pas être installées en zone à paludisme.

Les zones humides artificielles peuvent être mises en place en complément d'autres traitements. Elles peuvent être combinées avec d'autres unités de traitement à faible niveau de technicité, ou intervenir comme un traitement tertiaire après des boues activées ou du lagunage.

La diffusion de cette technologie dans les pays en développement est lente, malgré les conditions climatiques favorables. La conception de tels systèmes adaptés aux caractéristiques des zones tropicales et subtropicales doit encore faire l'objet de développement. Ce procédé a néanmoins été testé et mis en œuvre en Inde à Kothapally village (Telengana) (ICID 2015) sur des systèmes FWS pour identifier des plantes efficaces et évaluer les performances de traitement. Les EUT sont utilisées pour irriguer 1 ha de cultures.

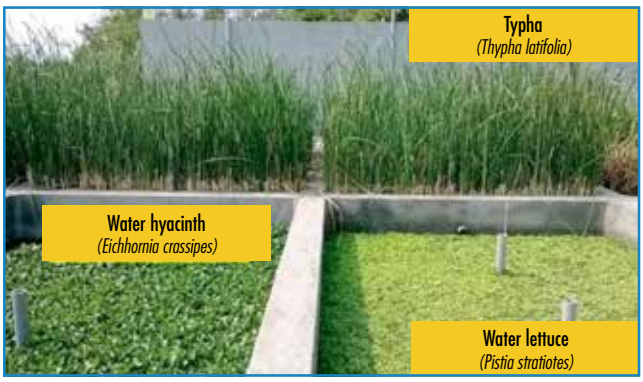


FIGURE 14 : FWS testés à Kothapally village (Inde) – Data et al. (2015) ICID 2015

Les filtres à sable Intermittents

Les filtres à sable intermittents sont utilisés depuis très longtemps dans la région méditerranéenne comme un procédé de traitement des eaux usées à faible coût et à faible besoin énergétique. Cette technologie est souvent utilisée comme étape tertiaire ou étape de désinfection, après un traitement conventionnel (bassins anaérobies).

Les systèmes de filtres à sable intermittents sont composés de lits de matériaux granulaires, ou de sable, drainés par le dessous (infiltration et percolation). Ce système aérobie est basé sur le principe de cycles d'inondation et de séchage des bassins d'infiltration. Ils retiennent des taux élevés de virus et d'œufs d'helminthes. Le niveau de désinfection des effluents secondaires dépend principalement du niveau de saturation et des taux de conductivité hydraulique (Choukr'Allah 2010).

Ce système est recommandé pour les petites stations comme traitement tertiaire ou de désinfection. Il requiert moins d'espace que les lagunes de maturation ou qu'un traitement sol-aquifère. Cette technique est simple en exploitation et exige de faibles coûts d'investissement et d'exploitation (Valentina Lazarova 2004).

Ces procédés de traitement ont été mis en œuvre en Lybie (Projet 12).

Le traitement par infiltration sol-aquifère

A la différence d'une réinjection directe dans l'aquifère **le traitement sol-aquifère ou « Soil Aquifer treatment (SAT) »** met en œuvre un bassin de surface d'infiltration qui peut assurer le traitement d'effluents de qualité médiocre, et évite la contamination microbienne des eaux souterraines. L'effluent est pompé dans un bassin qui alterne mise en eau et retrait d'eau. Les eaux usées s'infiltrent à travers une couche de colmatage en surface, puis une zone non saturée avant d'atteindre l'aquifère (zone saturée) (Valentina Lazarova 2004).

L'efficacité de ce système varie considérablement selon le type de sol et le taux de charge. Le temps de résilience hydraulique varie de quelques mois à un an. L'eau récupérée peut ensuite être utilisée pour l'irrigation sans restriction.

Ce procédé est mis en œuvre en fin de traitement à Korba en Tunisie (Projet 8) et dans le projet NGEST dans la bande de Gaza (Projet 9).

Le stockage

Le stockage est une étape essentielle et importante pour **égaliser les pics et combler les périodes**, puisque la demande en eau d'irrigation est variable et principalement située en saison sèche, alors que l'offre en eaux usées est globalement continue dans le temps (Asano 2008).

En Tunisie l'un des principaux freins de la REUT a été la nécessité de mettre en place des systèmes de stockage pour tamponner le décalage temporel entre la demande en eau d'irrigation et la disponibilité des eaux usées traitées (Asano 2008).

Deux types de stockage se distinguent :

- **le stockage court terme** (temps de résidence de l'ordre de quelques jours à quelques semaines). Ce sont des systèmes de bassins ouverts ou fermés. Ils sont utilisés pour des petits périmètres irrigués et pour des petits volumes. Une chloration résiduelle doit souvent être appliquée entre le stockage et la distribution ;
- **Le stockage long terme** (stockage saisonnier pendant la saison humide pour subvenir à une forte demande en irrigation en saison sèche). Des réservoirs de stockage de surface peuvent être mis en place. Le stockage à long terme peut également être réalisé dans les aquifères, pour assurer un approvisionnement en eau fiable, améliorer la qualité de l'eau. Il requiert alors de limiter et de contrôler les contaminations des eaux souterraines.

Les lagunes de maturation utilisées comme une étape de désinfection peuvent également être utilisés pour le stockage des eaux usées traitées.

Les systèmes de stockage et de distribution doivent tenir compte de l'évolution de la qualité de l'eau souvent sous-estimée. La qualité de l'eau peut en effet être détériorée ou améliorée sous l'effet du stockage et de la distribution entre la source de production et les points d'usage. Ces deux étapes doivent donc être considérées comme des processus de recontamination ou d'abattement potentielle et être anticipées lors du dimensionnement des systèmes de traitement (Valentina Lazarova 2004). Les mécanismes qui impactent la qualité de l'eau dans les réservoirs de stockage sont similaires à ceux mis en jeu dans les systèmes de lagunage. Des réservoirs profonds avec une petite surface sont recommandés (raisons économiques), néanmoins l'élimination des polluants est meilleure dans la couche supérieure d'eau où les températures sont plus élevées. S'il n'est pas possible de recourir à une chloration après le stockage, il est alors nécessaire de rincer

l'ensemble du système de distribution et le réseau d'irrigation avant utilisation pour limiter la croissance de biofilms et la dégradation induite sur la qualité de l'eau

Les EUT d'**As-Samra en Jordanie** sont transférées dans le Réservoir King Talal où elles se mélangent avec des eaux douces (stockage long terme et amélioration de la qualité des EUT).

QUELS SONT LES SYSTÈMES D'ÉPURATION ADAPTÉS À LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT?

Les études de cas mettent en évidence à la fois la nécessité et l'intérêt croissant pour des systèmes de traitement à **faible coût** et à **faible besoin d'entretien** tels que les système de lagunage, les zones humides, la filtration sur sable et l'infiltration vers les aquifères.

Le lagunage et les bassins aérés sont très répandus dans les pays tels que la Jordanie, la Tunisie et le Maroc (Asano 2008). Il y a cependant une tendance très marquée pour les **technologies de traitement intensif dans les grandes zones urbaines** (par exemple à Marrakech avec un procédé de boues activées dans le projet de réutilisation pour l'irrigation de palmiers et l'arrosage des espaces verts). Le système de lagunage intègre parfois une zone humide de type *Free Water Surface*, fournissant à la fois un temps de rétention identique à ceux des bassins de maturation de taille similaire tout en limitant le développement d'algues, sources de colmatage des réseaux (Barcelo 2010). L'infiltration vers les sols et aquifères peut également être utilisée comme traitement tertiaire après des lagunes (Projet 8), ou après un traitement secondaire classique (par exemple boues activée (Projet 9).

Dans le sud de la Méditerranée, les options de traitement à faible coût (zones humides, lagunes, filtres à sable ou infiltration) sont parfois peu performantes en termes de coûts et d'efficacité. En effet ces technologies low tech et extensives sont sans risques pour la réutilisation de l'eau, si et seulement si elles sont **correctement conçues et exploitées**. Le choix d'une technologie doit être fait au regard des conditions locales : la disponibilité des terres (les lagunes mobilisent plus d'espace que les filtres à sable), la disponibilité des matériaux et ressources (disponibilité en sable pour les filtres), etc.

Les systèmes d'épuration à haute performance et à haut niveau de technicité ne peuvent pas être considérés comme une unique solution dans les pays en développement. Ils sont intensifs en capitaux et requièrent de nombreux opérateurs spécialisés.

La qualité des eaux traitées, et donc les systèmes de traitement, doivent être adaptés aux usages envisagés en aval (cultures irriguées, aquaculture, recharge des nappes, etc.). Dans le contexte actuel de croissance du marché de la REUT le choix des technologies de traitement est essentiel : la technologie doit permettre d'assurer la rentabilité économique du projet et être adaptée (combinaison de technologies, dimensionnement) aux usages envisagés. Les solutions à haute et basse technicité sont toutes pertinentes dans cette approche, et **plusieurs filières parallèles pour plusieurs points finaux peuvent être appropriés pour du multi-usages** (CGIAR 2012) (Projet 2).

Les cas de Korba (Projet 8) et de Faisalabad (Projet 2) illustrent des cas où les technologies de traitement choisies initialement ne se sont pas révélées suffisantes et adaptées pour les usages envisagés. A Korba les EUT sont donc infiltrées avant pompage et réutilisation par les agriculteurs.

La sélection et la combinaison des technologies doivent être spécifiques au site, résulter de l'étude de différentes alternatives, être rentables, et être adaptées aux conditions locales (type d'eaux usées, conditions climatique, économiques, techniques et organisationnelles). Des solutions standards de technologies de traitement ne peuvent pas facilement être appliquées.

Plus les coûts financiers sont bas, plus la technologie est attrayante. Cependant, même une option à faible coût peut ne pas être financièrement viable : la durabilité économique est déterminée par la disponibilité réelle des fonds pour couvrir à minima les coûts d'exploitation et de maintenance. L'objectif ultime devrait être le recouvrement des coûts totaux, bien que, dans un premier temps, des montages financiers particuliers tels que des subventions croisées et des programmes d'investissement séquentiels soient nécessaires (Choukr'Allah 2010).

Evidemment, les projets de REUT requièrent non seulement un traitement approprié, mais également, en amont, un système de collecte des eaux usées efficace et bien entretenu.

PERSPECTIVES POUR DES DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Les schémas types de réutilisation dans les zones périurbaines sont souvent des systèmes urbains centralisés mis en œuvre sur de vastes superficies.

Des développements de systèmes décentralisés d'assainissement et de REUT associée (petite échelle locale) seraient pertinents en zones rurales et péri-urbaines (par exemple la réutilisation des eaux grises au niveau des ménages pour l'irrigation de jardin) mais également dans des contextes urbains en croissance rapide où l'installation de collecte centralisée et d'infrastructures de traitement ne sont pas rentables (CGIAR 2012).

En Égypte, des systèmes décentralisés de traitement et de réutilisation à faibles coûts sont nécessaires dans les zones rurales éloignées où il n'y a pas de planification de développement d'infrastructures de traitement centralisées.

A Gaza, les infrastructures centralisées d'assainissement des villes sont déficientes : des unités à l'échelle des foyers et à bas coût ont été mises en place par des ONG.

Ainsi, davantage de travaux de recherche et de développement devraient cibler :

- le développement de technologies de traitement alternatives robustes, moins consommatrices d'énergie (Sanghi 2013) ;
- la prise de conscience par les décideurs de la large gamme de technologies de traitement existantes et disponibles qui pourraient convenir à leurs besoins ;
- le développement de technologies de traitements et de réutilisation décentralisées et à faible coût (échelle des foyers et des bâtiments).

CHAPITRE 3

Quels impacts sur les ressources en eau, le sol et l'énergie ?

INTRODUCTION

Les ressources en eau et en énergie mais également les systèmes agronomiques irrigués (sols et cultures) sont en interrelation :

- L'eau et l'énergie sont mutuellement dépendantes : les infrastructures en eau sont très consommatrices en énergie (traitements et transferts) alors que les ressources en eau sont dans de nombreux pays mobilisées pour la production d'énergie (barrages hydroélectriques) ;
- Les systèmes irrigués consomment des ressources en eau et participent à leur appauvrissement en termes quantitatif et qualitatif ; les sols et les cultures peuvent en retour être affectés par la qualité des eaux d'irrigation ;
- L'énergie est nécessaire pour la production agricole (travail du sol, production d'engrais, etc.), ainsi que pour l'irrigation (pompage). La production agricole est également une source d'énergie, autant sous la forme de cultures alimentaires que de cultures biomasse-énergie.

Les eaux usées, qu'elles soient réutilisées ou non, traitées ou non, font aussi **partie de ce nexus**.

Les eaux usées non traitées, rejetées au milieu ou réutilisées, peuvent impacter négativement et de manière importante les ressources en eau et les sols, mais elles permettent également de réaliser des économies d'énergie (traitement et production de fertilisant évités - voir Chapitre 1).

D'un autre côté, les territoires trouvent dans le traitement de ces eaux usées le moyen de disposer d'une ressource de bonne qualité qui peut être utilisée pour restaurer les masses d'eau ou pour irriguer en toute sécurité. Néanmoins, les étapes de traitement et de pompage ajoutent des coûts énergétiques élevés (voir Chapitre 2).

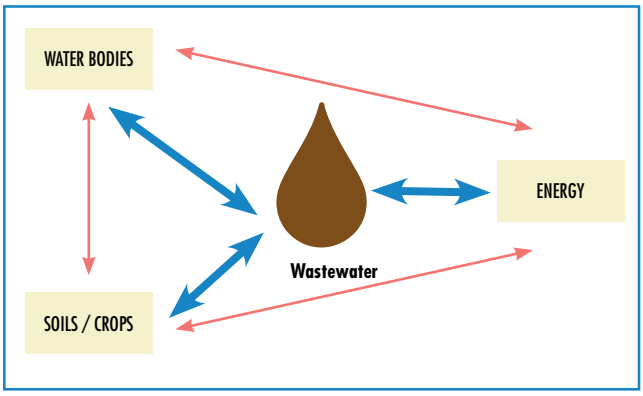


FIGURE 15 : Nexus eaux usées, sols, ressources en eau et énergie - Schéma Ecofilae

Les décideurs doivent tenir compte de ces impacts environnementaux, énergétiques, économiques et agronomiques lors de la conception de leurs filières de réutilisation des eaux usées. Plusieurs outils d'évaluation existent, ils sont décrits dans le Chapitre 5.

Le présent chapitre traite des **interactions spécifiques entre la réutilisation des eaux usées et les différents compartiments (ressources en eau, sols, plantes et énergie)** (Figure 15). L'approche développée consiste en une comparaison de scénarii – avec et sans réutilisation, ce dernier étant considéré comme scénario de référence - afin de mieux caractériser les impacts des eaux usées traitées sur ces compartiments. Cette approche s'inspire des méthodologies et des outils d'aide à la décision décrits dans le Chapitre 5 (Analyse Coûts/Bénéfices et Analyse du Cycle de Vie).

LES INTERRELATIONS ENTRE RÉUTILISATION DES EAUX USÉES ET ÉNERGIE

L'agriculture périurbaine se développe dans de nombreux pays en développement. Dans ces zones où les ressources conventionnelles sont souvent déjà surexploitées ou polluées de nouvelles ressources doivent être identifiées. Des investissements lourds et des coûts énergétiques élevés sont requis pour acheminer de nouvelles ressources conventionnelles (eaux douces de surface ou souterraine) supplémentaires dans les zones de production agricole. Les eaux usées (traitées ou non) produites localement sont vues comme une ressource locale précieuse et à haute valeur pour l'agriculture. La réutilisation des eaux usées et la production agricole à proximité des villes et des consommateurs permet de réduire à la fois le transport (eau et produits agricoles) et les coûts en énergie (concept d'économie circulaire).

L'efficacité énergétique est un facteur clé de la durabilité des projets de réutilisation des eaux usées dans les pays en développement. Les coûts d'électricité et d'énergie y sont généralement élevés, avec un service de fourniture d'électricité pas toujours fiable.

Mais la réutilisation des eaux usées est également considérée comme un moyen de récupérer de l'énergie, elle permet en effet de maximiser l'efficience des nutriments (Chapitres 1 et 2).

Certains procédés de traitement des eaux usées permettent de produire de l'énergie (production de biogaz lors de la digestion anaérobie et processus de méthanisation).

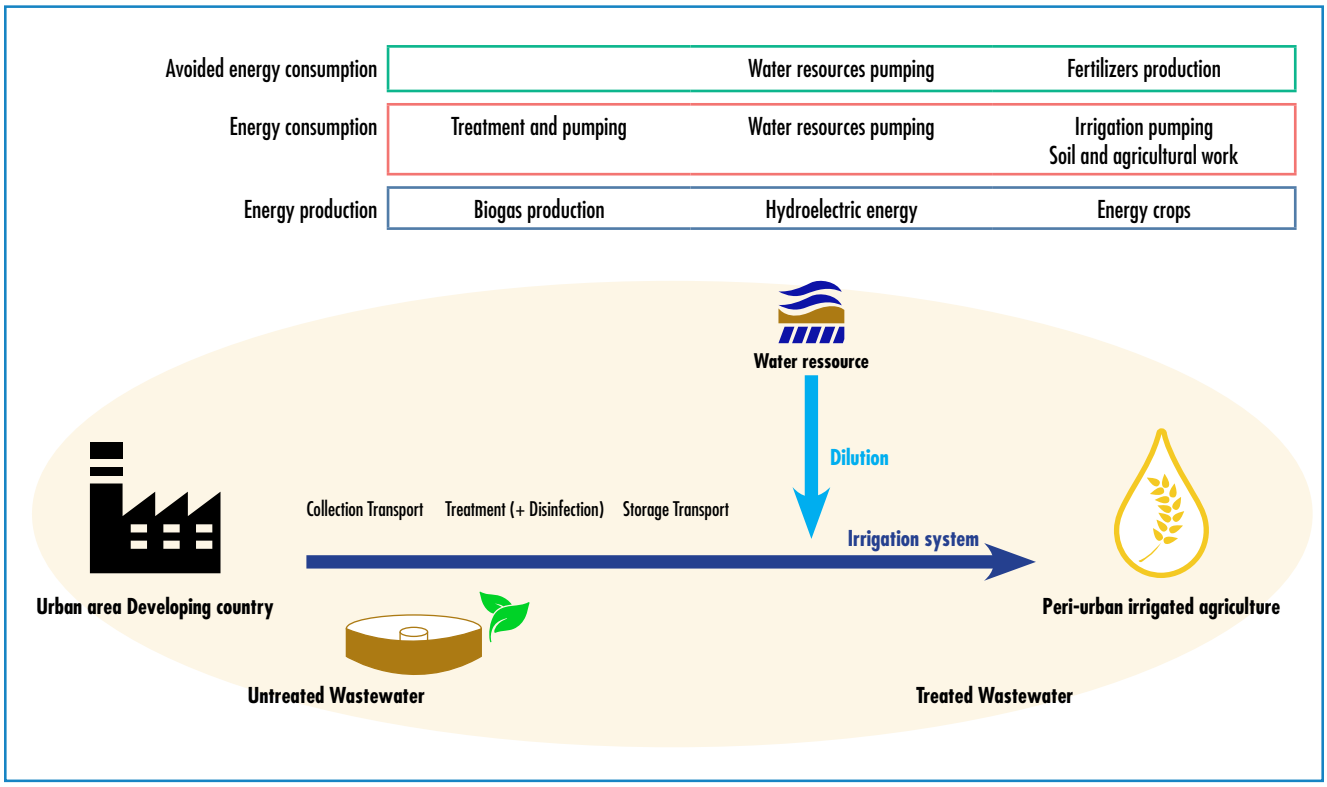
Ces interactions entre réutilisation des eaux usées et de l'énergie sont présentées dans la Figure 16.

Scénario de référence : un traitement conventionnel des eaux usées sans réutilisation et des systèmes irrigués avec des eaux conventionnelles

Consommation énergétique liée au traitement des eaux usées

La plupart des systèmes de traitement des eaux usées dans le monde exigent une consommation énergique élevée, tout particulièrement lorsqu'il s'agit de faire fonctionner des systèmes de traitement avancés qui utilisent des membranes (Ahmed 2010). On estime que plus de **5% de l'électricité mondiale est utilisée pour traiter les eaux usées** (Deslauriers 2004). Les coûts énergétiques peuvent représenter jusqu'à 30% des coûts totaux de fonctionnement et d'entretien des stations d'épuration et une hausse de ce chiffre est prévue dans les prochaines décennies (Carns 2005).

FIGURE 16 : Interactions entre réutilisation des eaux usées et énergie - Schéma Ecofilae



Les principaux facteurs déterminant la consommation d'énergie pour le traitement sont la taille de l'usine (capacité de traitement), et les technologies mobilisées. En général, plus les niveaux de traitement sont élevés plus les coûts énergétiques le sont. La consommation énergétique a également un coût en termes d'émissions de gaz à effets de serre, et les impacts globaux des industries de traitement des eaux usées sont considérables. Le coût des émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie utilisée dans le traitement des eaux usées est de 0,02 €/m^3 en Israël, valeur obtenue en multipliant la valeur de l'externalité (prix du carbone)/kWh par la consommation de kWh/m^3 (Condom 2012).

Production d'énergie par le traitement des eaux usées

La digestion anaérobie des eaux usées dans les procédés à boues activées permet la production de biogaz. Les gaz CH4 et N2O sont émis lors de la dégradation des boues organiques par des bactéries anaérobies. Aux États-Unis, il est estimé que ces émissions atteignaient 15,5 Tg de C02-eq pour le CH4 (2000) et 32 Tg de C02-eq pour le N2O (2006). Ces chiffres représentent environ 0,7% des émissions totales de gaz à effet de serre des États-Unis (USEPA 2008). Cette source d'énergie renouvelable peut être valorisée de la même manière que les gaz fossiles naturels. La production de biogaz est impossible avec les technologies de traitement extensives (lagunes).

En **Algérie** la station d'épuration de **Barakis** a une capacité de 900 000 EH. Un procédé de boues activées a été mis en œuvre. 2 200 m^3 de biogaz sont produits chaque jour par des digesteurs anaérobies. Le biogaz est ensuite partiellement utilisé pour faire fonctionner les chaudières de l'usine. Les eaux usées traitées sont ensuite déversées dans le barrage de Douera avant d'être indirectement réutilisées à plusieurs fins, y compris l'irrigation de la plaine de la Mitidja (Zemmouri 2011).

Le pompage pour le transport de l'eau

Le pompage des eaux usées, depuis leur collecte jusqu'au rejet dans l'environnement après traitement est très consommateur en énergie.

L'approvisionnement en eau des systèmes irrigués à partir de ressources en eau conventionnelles consomme souvent beaucoup d'énergie du fait de la distance entre l'eau disponible et les zones irriguées (sauf si écoulement gravitaire) : des pompages dans les ressources souterraines profondes ou des transferts d'eau sur de longues distances peuvent être nécessaires.

L'énergie nécessaire pour la production des engrais

Le recours aux engrais date du début des années 1900 dans l'agriculture occidentale et leur utilisation continue de croître à un rythme soutenu dans les pays en développement. La production d'engrais est très consommatrice en énergie (par exemple la production d'engrais azotés à partir de gaz naturel, source d'énergie principale pour la fabrication de l'ammoniac anhydre) et compte dans les consommations d'énergie indirectes d'une exploitation agricole.

Scénario de réutilisation : un traitement adapté pour une réutilisation agricole des eaux traitées

Dans les filières de réutilisation des eaux usées, les deux principaux postes de consommation en énergie sont le traitement des eaux usées et leur transport (de leur collecte jusqu'à leur utilisation finale au champ).

Les spécificités de traitement des eaux usées

Un traitement complémentaire qui augmente la consommation totale d'énergie pour la phase de traitement est souvent nécessaire pour la REUT : des procédés d'aération, de filtration et de désinfection.

Les procédés de traitement anaérobies tels que les lagunes

anaérobie ne nécessitent pas d'oxygène, ils consomment globalement moins d'énergie.

Les technologies de désinfection par UV largement répandues dans les pays développés sont rarement utilisées dans les pays en développement. Elles ajoutent des coûts élevés d'énergie, reposent sur la fiabilité de l'approvisionnement en énergie, sur la fourniture de lampes de secours, etc. On note le développement d'unité solaire autonome de traitement de désinfection UV.

Le choix de la qualité de l'eau, et donc le niveau de traitement de l'eau, qui doivent être adaptées à l'usage final de l'eau et aux règlementations en vigueur, doivent permettre un ajustement et une optimisation des consommations énergétiques liées au traitement.

Les alternatives de traitement qui permettent de réduire les consommations énergétiques sont essentielles pour l'avenir. Les traitements naturels via des zones humides, la recharge contrôlée des aquifères ou des lagunes ont globalement une empreinte énergétique réduite.

L'évaluation complète des coûts énergétiques des technologies de traitement doit être effectuée spécifiquement pour le site considéré sur la base des tarifs locaux d'électricité.

Le pompage pour le transport de l'eau

La réutilisation des eaux usées se fait généralement localement. Les coûts énergétiques pour le transport sont réduits, mais doivent néanmoins être correctement évalués en tenant compte des facteurs suivant :

- Les distances et les élévations entre les sources d'eaux usées brutes et la station d'épuration, et entre la station d'épuration et la zone irriguée ;
- Les techniques d'irrigation utilisées : les systèmes haute pression tels que l'irrigation par aspersion, sont de plus gros consommateurs en énergie que le goutte à goutte ou l'irrigation à la raie.

En Israël, l'énergie nécessaire pour le transport des eaux usées traitées réutilisées pour l'irrigation a été estimée à 0,5 kWh/m^3 (Condom 2012).

L'évitement des coûts énergétique de production des fertilisants

L'OMS a estimé en 2006 que la valorisation des nutriments de toutes les eaux usées produites dans le monde conduirait à des gains de l'ordre de 33% en engrais azotés et de 22% en engrais phosphatés (WHO 2006).

L'incapacité à récupérer la matière organique et les nutriments des eaux usées est une énorme perte de ressources qui au lieu d'être utilisées en agriculture viennent polluer les rivières (Volkman 2003). Fermer la boucle des nutriments et de la matière organique en les valorisant à la source (eaux usées brutes ou séparation lors du traitement) donne un sens à l'approche de gestion durable des eaux usées, ressources précieuses.

Les procédés de traitement anaérobies ont été mis au point car ils permettent justement une meilleure préservation de l'azote biologique et de phosphore dans les eaux usées traitées.

Production de plantes pour la biomasse énergie

Les cultures non alimentaires mais à vocation énergétique sont parfaitement adaptées à la réutilisation (tolérance à la salinité, risque limité d'impacts sanitaires, etc.).

En Égypte par exemple, plusieurs projets à travers le pays consistent à réutiliser des eaux usées traitées pour irriguer des plantations d'arbres dont la biomasse est utilisée à des fins énergétiques.

Conclusion

Comparée à l'importation de nouvelles ressources ou même encore à la désalinisation d'eau de mer la REUT est une filière moins consommatrice en énergie.

Les technologies de traitement à faible coût, à faible consommation d'énergie et qui **préservent les nutriments**, tout comme **la proximité entre sources et usages** de ces eaux, tendent à réduire la consommation en énergie.

Il serait pertinent de conduire sur des sites spécifiques des bilans d'énergie (analyse monocritère en mettant l'accent sur l'énergie) et des méthodologies Analyse du Cycle de Vie (analyse multicritères, y compris l'équilibre énergétique) pour obtenir une meilleure vue d'ensemble de toutes les interactions entre énergie et réutilisation des eaux usées (voir Chapitre 5). Un indicateur de l'empreinte énergétique de la filière de réutilisation des eaux usées pourrait alors être exprimé en kWh/m^3 irrigué ou kWh/m^3 irrigué x prix du Kwh ou kWh/ha irrigué.

LES IMPACTS DE LA RÉUTILISATION SUR LES RESSOURCES EN EAU

Les eaux usées traitées (mais aussi, non traitées) sont considérées comme une ressource additionnelle d'eau essentielle et précieuse dans des contextes de déficit hydrique et de dégradation quantitative et qualitative des ressources en eaux superficielles et souterraines qui constituent deux des principaux moteurs de la REUT dans les pays en développement.

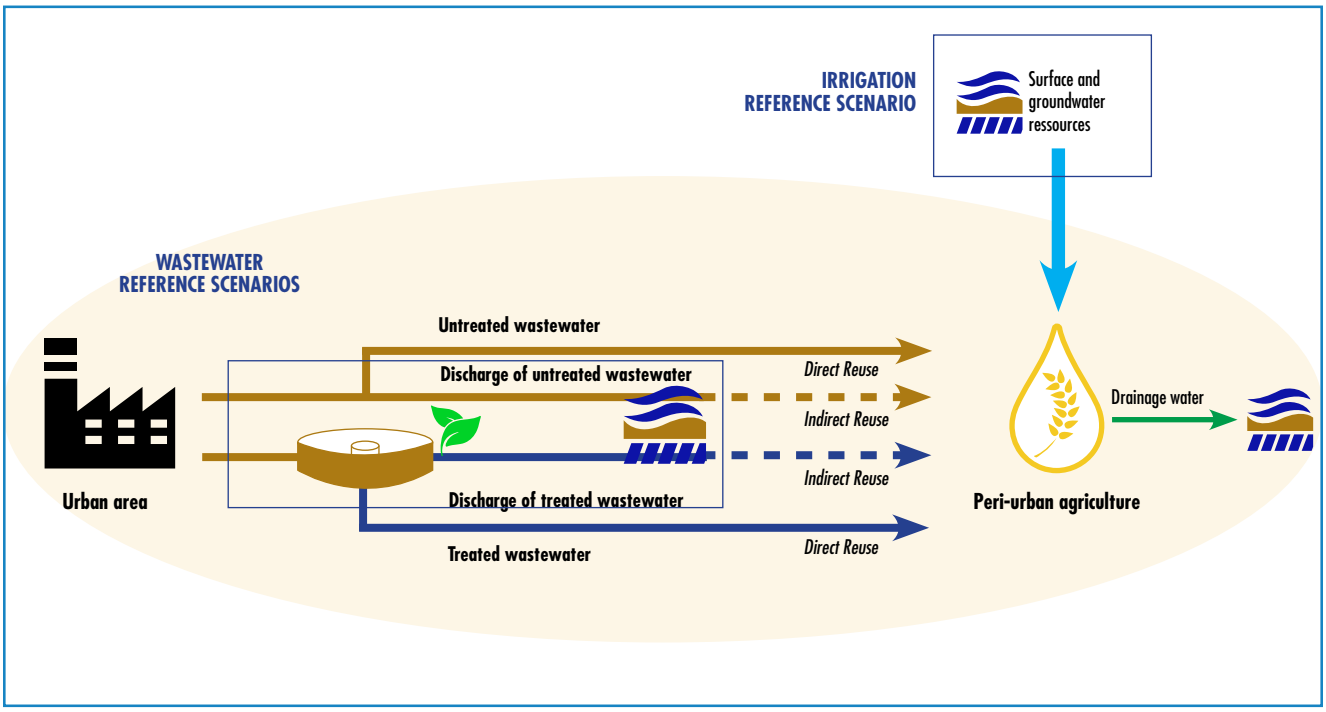
Dans la Figure 17, différents scénarii mettant en jeu les eaux usées et l'irrigation (avec et sans réutilisation) et les liens avec les ressources (de surface et souterraines) sont présentés.

La REUT pour préserver quantitativement les ressources en eau conventionnelles

La REUT en agriculture permet de préserver et de réduire les pressions sur les ressources locales de surface et sur les aquifères associés, conventionnellement utilisés pour l'irrigation. Ces ressources disponibles peuvent alors être mieux (ou autrement) valorisées, par exemple à des fins de préservation de l'environnement. Dans de nombreuses villes côtières, les aquifères sous-jacents sont souvent menacés par des risques élevés de salinité (intrusions marines ou surexploitation).

Dans le delta du **Mékong au Vietnam** la salinité des eaux augmente (intrusion saline), conséquence du changement climatique. En 2012, 1,7 millions d'hectares (42% de la surface) étaient affectés par le sel. La réutilisation des eaux usées dans le secteur agricole est considérée comme une mesure d'adaptation qui répond à la pénurie d'eau causée par le changement climatique et aux intrusions salines résultant de l'élévation du niveau de la mer. Les eaux usées

FIGURE 17 : Les interactions entre réutilisation des eaux usées et ressources en eau - Schéma Ecofilae



des systèmes aquacoles sont même réutilisées pour l'irrigation du riz dans certains districts (Thi Trinh 2013).

A Settat au Maroc (Projet 4) l'un des objectifs du projet est de préserver les ressources en eau souterraines qui ont longtemps été surexploitées pour des usages agricoles.

Dans d'autres endroits, les ressources conventionnelles peuvent être de qualité inférieure à celle des eaux usées traitées.

Les rejets d'eaux usées non ou faiblement traitées et la potentielle réutilisation indirecte

Les eaux usées domestiques brutes ont longtemps été (et sont encore dans de nombreuses villes) déversées dans les émissaires de la ville, dans des drains ouverts ou des canaux, avant d'atteindre les masses d'eaux naturelles. De telles pratiques ont conduit à des catastrophes environnementales.

A Accra au Ghana (Projet 1) la rivière Odaw est le réceptacle de nombreux exutoires urbains, y compris les eaux usées domestiques non traitées. Ce désastre environnemental a conduit à la contamination des lagunes de Korle en aval. Les agriculteurs ont utilisé pendant des années et dans plusieurs localités périurbaines cette ressource hautement contaminée d'un côté, mais également très riche en éléments nutritifs (directement ou après dilution avec des ressources naturelles).

La pollution des eaux de surface ou des eaux souterraines et les risques associés de contamination humaine constituent les principaux moteurs des projets de traitement des eaux usées. La réutilisation des eaux usées à des fins agricoles ou environnementales est maintenant de plus en plus intégrée aux nouveaux projets d'épuration des eaux usées, dans le cadre de la gestion intégrée des ressources en eau.

Dans le cas de la station de Beit Lahia en Palestine (Projet 9), les eaux usées faiblement traitées s'infiltraient dans les ressources souterraines, avec un très fort risque de contamination sanitaire en cas de prélèvement. La nouvelle station d'épuration de Jabaliya vise à réduire les risques et l'exposition grâce à de meilleurs traitements et des bassins d'infiltration.

Le rejet des eaux usées traitées et la potentielle réutilisation indirecte

Les eaux usées traitées peuvent également être utilisées directement pour des objectifs de préservation de l'environnement ou énergétiques tels que la recharge des ressources de surface ou des eaux souterraines.

A Bogota en Colombie (Projet 11), les eaux usées traitées sont utilisées pour maintenir un débit suffisant dans la rivière Bogota. L'énergie potentielle de l'eau est valorisée par des centrales hydroélectriques en aval assurant une part essentielle de production énergétique du pays.

À Delhi en Inde (Projet 6), les eaux usées traitées de la station d'Okhla sont partiellement rejetée dans la rivière Yamuna (par le canal d'Agra), ce qui permet d'en améliorer la qualité.

Les aquifères surexploités peuvent ainsi être rechargés avec des eaux usées traitées en utilisant des bassins d'infiltration ou par des techniques de recharge directe. Dans ces cas, les eaux usées sont souvent utilisées pour limiter l'impact des intrusions d'eau de mer.

A Korba en Tunisie (Projet 8), les eaux usées traitées sont utilisées pour recharger un lagon naturel et une ressource souterraine, et de ce fait limiter les remontées du biseau salin. Elles sont également réutilisées par les agriculteurs indirectement par pompage dans la ressource souterraine.

Dans la bande nord de Gaza en Palestine (Pays 5), les eaux souterraines sont menacées par la surexploitation et par les intrusions marines. L'eau souterraine est rechargée avec des eaux usées faiblement traitées par des bassins d'infiltration (Projet 9). La nouvelle station d'épuration de Jabalya et ses nouveaux bassins d'infiltration permettra d'améliorer la qualité et d'augmenter la quantité des eaux usées traitées déversées.

Ainsi, davantage d'eau pourra être pompée et réutilisée indirectement pour l'agriculture.

Les eaux de drainage

Les eaux usées, qu'elles soient traitées ou non, réutilisées en agriculture peuvent percoler vers les eaux souterraines et/ou être drainées hors des champs. Les drainages de surface et souterrain acheminent ces eaux en dehors de la zone agricole.

La qualité des eaux de drainage dépend de la qualité de l'eau d'irrigation, des pratiques agricoles, mais aussi de la capacité du sol à faire percoler et à agir sur la rétention et la dégradation des différents polluants (organiques, mais également inorganiques). La salinité, les composants microbiens et les teneurs résiduelles en pesticides peuvent alors être des problèmes majeurs. Les interactions entre les eaux de drainage et des eaux souterraines en termes de salinité sont détaillées dans le paragraphe ci-dessous.

L'eau de drainage recueillie est généralement de plus forte teneur en sels que l'eau d'irrigation appliquée, une élimination adaptée (ou une réutilisation adaptée) est alors souvent nécessaire.

En Égypte (Pays 4), les eaux usées traitées et les eaux non traitées sont déversées dans le Nil et dans les canaux de drainage du Delta. Les eaux de drainage sont aussi recueillies dans ces canaux de drainage. L'eau est ensuite indirectement réutilisée pour les productions agricoles. D'une manière générale, plus on va vers l'aval et plus les productions agricoles sont adaptées pour être tolérantes à la salinité.

LA SALINITÉ DES EAUX USÉES TRAITÉES : IMPACTS ET SOLUTIONS DE GESTION

Impacts généraux et défis posés par la salinité

Les eaux usées peuvent potentiellement avoir des impacts négatifs sur les sols, les cultures et l'environnement proche. Selon leur origine et selon le niveau de traitement les eaux usées peuvent encore contenir des concentrations élevées d'une large gamme d'agents pathogènes et de composés chimiques (polluants). Les composées chimiques préoccupant comprennent les sels, les métaux (en particulier dans le cas des rejets industriels), les résidus de micropolluants, l'azote (principalement sous forme de nitrates), etc. Parmi tous ces produits chimiques, la salinité est l'un des facteurs les plus importants en termes d'effets agronomiques et environnementaux indésirables.

Les mécanismes de la salinité et les impacts majeurs

La salinité dans l'eau s'exprime en quantité de matières dissoutes totales (ou résidus secs) (MDT en g/L) ou à travers la conductivité électrique (CE en dS/m ou mS/cm). Elle peut être mesurée soit directement dans l'eau, ou dans l'eau extraite d'un sol. Les principaux ions concernés sont le sodium, le potassium, le calcium et le chlorure.

Les sels réduisent la durée de vie utile du matériel d'irrigation, impactent les sols, les cultures irriguées et l'environnement proche, y compris les eaux souterraines sous-jacentes.

a) Impacts du sel sur la fertilité des sols

L'irrigation avec de l'eau chargée en sels monovalents (Na+ et K+) peut dégrader la structure du sol et rendre infertiles des terres arables en réduisant les taux d'infiltration et en élevant la sodicité ou le taux de potassium échangeable. La salinisation des sols et le risque de sodisation dépendent des propriétés intrinsèques du sol (texture, structure, profondeur, teneur en matière organique, etc.), de l'eau d'irrigation (composition, quantité et fréquence d'application), mais également des conditions climatiques (les climats secs à forte évaporation concentrent les sels dans le sol) et des pratiques culturales.

Les sols sont généralement dits salins quand la conductivité électrique de l'eau extraite est supérieure à 4 dS/cm, et sont dits sodiques quand leur solution présente un SAR[1] supérieur à 13 ou la proportion de sodium dans la CEC[2] est supérieure à 15% (Kallel 2012).

b) Impacts directs du sel sur les cultures

La salinité impacte directement les cultures de manière différenciée selon :

- la capacité des cultures à extraire l'eau des sols dans des milieux à salinité et à pressions osmotiques élevées ;
- Les niveaux de tolérance des cultures à l'accumulation ionique (les principaux ions toxiques sont le bore, le sodium et le chlorure) ;
- Les méthodes d'irrigation et d'apport de l'eau.

Les dégâts au niveau des feuilles (brûlures ou absorptions foliaires de sel) peuvent se produire, surtout si le temps est chaud et sec, en cas d'irrigation par aspersion. L'irrigation de nuit est alors recommandée.

Les plantes sont plus sensibles à la salinité dans la zone racinaire. Les valeurs seuils généralement considérées pour l'eau d'irrigation sont environ 0,7 dS/m (450 g/L) pour les cultures sensibles aux sels, 1,8 dS/m (1150 g/L) à 4,0 dS/m (2600 g/L) pour celles modérément tolérantes, et 6,5 dS/m (4200 g/L) pour les plantes tolérantes aux sels. Le choix des espèces cultivées devraient donc être raisonné après évaluation de la qualité de l'eau, avec une attention particulière sur les paramètres de salinité (pics, variations et valeurs moyennes).

La tolérance des plantes à la salinité, la conséquente diminution des rendements et les mécanismes associés sont bien connus et rapportés dans les lignes directrices de l'ouvrage *Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grasses* de Lazarova et Bahri, publiées 2004 (Valentina Lazarova 2004).

Si l'eau d'irrigation est saline, il est nécessaire d'en appliquer d'avantage que le besoin en eaux des plantes pour l'évapotranspiration, de sorte à ce que les sels soient lessivés en profondeur et percolent en dessous de la zone racinaire. La conductivité hydraulique du sol doit être suffisamment élevée pour permettre un lessivage suffisant. Ce paramètre est un critère essentiel pour la réussite d'une irrigation avec des eaux salées.

1 - Le Coefficient d'absorption du sodium (SAR Sodium Absorption Ratio) est une mesure de l'aptitude de l'eau pour l'irrigation, mais aussi de la sodicité de l'eau extraite du sol. La formule est SAR = Na+/((Ca2++Mg2+)^(1/2))x(1/2).

2 - Le pourcentage de sodium échangeable est le pourcentage de Na+ du sol dans la Capacité d'échange cationique (CEC).

Plus les conductivités électriques des eaux et plus la sensibilité des sols et des cultures est forte, plus les besoins de lixiviation sont élevés (en termes de volume et de fréquences). Typiquement, un taux de lixiviation de 10% convient pour la plupart des cas, ce qui abaisse le rendement d'irrigation maximum de 90%.

c) Impacts sur les eaux souterraines

Les impacts d'une irrigation à partir d'eau salée (et lixiviation associée) peuvent être dommageables sur les ressources en eau souterraines. Il convient de mener avec vigilance la lixiviation du sol cultivé : les sels se concentrent dans l'eau de lixiviation qui transite depuis la zone racinaire jusqu'à la nappe phréatique sous-jacente. Ce phénomène peut provoquer des remontées de nappe (recharge et capillarité osmotique), engorger la surface du sol et au final créer des croûtes de sels en surface (évaporation de surface). Le niveau des eaux souterraines doit donc être suivi.

De nombreuses populations ont ainsi du et doivent encore dans certaines régions du globe quitter des terres arables. Ce phénomène reste toujours une menace pour de nombreuses zones irriguées dans le monde.

Le drainage souterrain et le pompage des eaux souterraines permettent de limiter la remontée des eaux souterraines et des sels et d'exporter les eaux en dehors du périmètre irrigué. Le pompage des eaux souterraines permet également de maintenir l'eau contaminée dans la partie supérieure de l'aquifère. L'élimination des eaux usées et pompées peut en revanche poser un problème important suivant sa qualité et sa teneur en sels.

Pour mieux comprendre et anticiper les flux de sels, des études locales au champ sur le sol et sa géochimie sont nécessaires. Les relations entre eaux de drainage salinisées et eaux souterraines sont décrites dans le chapitre 8.3.1 du livre *Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grasses* de Lazarova et Bahari publié en 2004 (Valentina Lazarova 2004), et ne sont pas davantage développées dans la présente étude.

Les effets de la salinité sur les sols et les eaux souterraines sont souvent visibles après quelques années, en fonction de la texture du sol, des propriétés chimiques et hydrauliques, mais également de la profondeur des eaux souterraines. La FAO a proposé des normes de qualité de l'eau pour l'irrigation qui considèrent la salinité et les taux de SAR (Tableau 3).

Les impacts liés à la salinité des eaux usées

Dans la ville de **Sfax en Tunisie** des tests ont été menés pour évaluer les impacts d'eau usées traitées salines sur différents types de sols (Kallel 2012) (Pays 1).

Les eaux usées non traitées et traitées peuvent contenir des niveaux élevés de sels. L'origine des sels peut être identifiée parmi les producteurs d'eaux usées industrielles et dans des connexions des réseaux avec des eaux salées (par exemple dans des zones côtières des infiltrations d'eaux salées souterraines dans le réseau de collecte des eaux usées). Une gestion aussi prudente que pour les eaux conventionnelles d'irrigation salinisées doit être effectuée en amont de l'installation des systèmes d'irrigation. La qualité des effluents doit être correctement caractérisée et évaluée avant utilisation.

TABLEAU 3 : Standards pour la qualité de l'eau d'irrigation pour les cultures - Lignes directrices de la FAO - FAO, 1998[1]

POTENTIAL IRRIGATION PROBLEM		UNITS	DEGREE OF RESTRICTION ON IRRIGATION		
			NONE	Slight to Moderate	SEVERE
Salinity (affects crop water availability)[2]					
	EC_w	dS/m	<0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
	TDS	mg/L	< 450	450 - 2000	> 2000
Infiltration (affects infiltration rate of water into the soil, evaluate using ECw and SAR together)[3]					
SAR	0-3	and ECw =	> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
	3-6		> 1.2	1.2 -0.3	< 0.3
	6-12		> 1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
	12-20		> 2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
	20-40		> 5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
Specific Ion Toxicity (affects sensitive crops)					
	Sodium (NA)[4]				
	surface irrigation	SAR	<3	3-9	>9
	sprinkler irrigation	meq/l	<3	>3	
	Chloride (Cl)[4]				
	surface irrigation	meq/l	<4	4 -10	>10
	sprinkler irrigation	meq/l	<3	>3	
	Boron (B)	mg/l	<0.7	0.7-3.0	>3.0
Miscellaneous Effects (affects susceptible crops)					
	Nitrate (NO_3-N)	mg/L	<5	5-30	>30
	Bicabornate (HCO_3)	meq/L	<1.5	1.5-8.5	>8.5
	pH		**Normal Range 6.4 = 8.4**		

1 Adapted from FAO (1985)
2 EC_W means electrical conductivity, a measure of the water salinity, reported in deciSiemens per meter at 25°C (dS/m) or in millimhos per centimeter (mmho/cm); both are equivalent.
3 SAR is the sodium adsorption ratio; at a given SAR, infiltration rate increases as water salinity increases.
4 For surface irrigation, most tree crops and woody plants are sensitive to sodium and chloride; most annual crops are not sensitive. With overhead sprinkler irrigation and low humidity (< 30 percent), sodium and chloride may be absorbed through the leaves of sensitive crops.

A Ouagadougou au Burkina Faso (Projet 5), les sols irrigués avec des eaux usées traitées sont affectés par la salinité.

Les niveaux de salinité varient d'un effluent municipal à un autre, selon l'utilisation de l'eau dans les ménages, qui peut varier entre 30 et 300 litres par personne et par jour dans les pays en développement. Les ions responsables de la salinité (Na+, K+, Ca2+ et Cl-) sont considérés comme des polluants non biodégradables et peuvent s'accumuler dans le sol, surtout si les eaux usées contiennent des effluents industriels. Dans certains cas, des concentrations élevées en chlorure sont le paramètre limitant le potentiel de réutilisation, la chloration étant une étape tertiaire de traitement avant la distribution.

A Settat au Maroc (Projet 4), des niveaux élevés de salinité des eaux usées traitées ont déjà été signalés. Le problème pourrait davantage s'aggraver si des eaux usées industrielles rejoignaient le réseau de collecte des eaux usées.

Dans des conditions climatiques sèches une attention particulière doit être accordée sur les sels (mais aussi sur les autres composants chimiques) dans tous les masses d'eau car l'évaporation favorise la concentration. Dans le cas de réutilisation des eaux usées, la concentration en sels peut se produire pendant le traitement (notamment en cas de traitement extensif comme le lagunage), pendant le stockage, et pendant la réutilisation et rester présente dans les sols, mais aussi dans les eaux de drainage en fonction de la pluviométrie et de l'efficacité de l'irrigation.

Les eaux salées se concentrent dans les sols et sont souvent mal drainées : les niveaux de salinité dans les eaux souterraines sous-jacentes à la parcelle irriguée peuvent ainsi être jusqu'à 5 fois plus élevés (pour une efficacité d'irrigation de 80 %) que dans les eaux usées appliquées elles-mêmes. Une attention particulière doit donc être portée aux effets à long terme de l'irrigation avec des eaux usées (sols et eaux souterraines). Les phénomènes de colmatage du sol dû à une teneur élevée en matières solides en suspension dans les eaux usées et à une dégradation de la structure du sol peuvent également se produire.

Néanmoins l'irrigation avec des eaux usées salinisées traitées ou non peut être durable si une gestion adéquate est mise en oeuvre. Un nouvel équilibre des paramètres chimiques du sol se met alors en place.

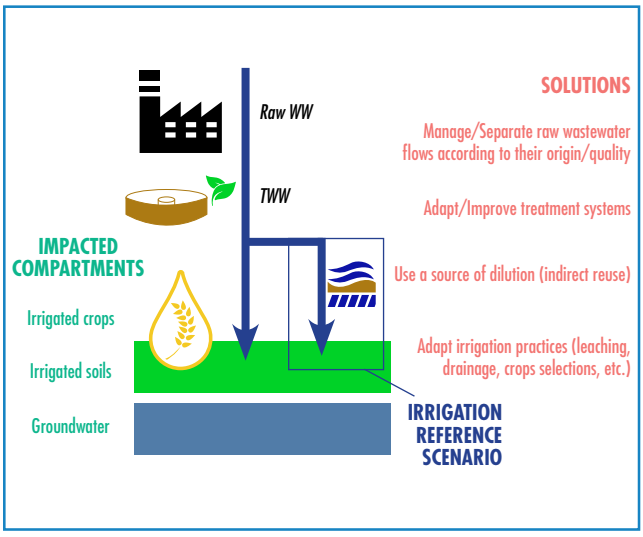


FIGURE 18 : La salinité dans la réutilisation des eaux usées : compartiments impactés et solutions existantes - Schéma Ecofilae

Solutions

De nombreux projets de réutilisation des eaux usées (avec un traitement plus ou moins poussé, voire sans traitement) sont confrontés à des problèmes de salinité. Des solutions (Figure 18) peuvent mises en œuvre à différents niveaux dans la filière de réutilisation pour contrôler et limiter les impacts agronomiques et environnementaux.

Contrôle à la source de la qualité des eaux usées collectées

Les eaux usées domestiques urbaines doivent être protégées en détournant ou traitant séparément les effluents et les saumures industrielles de mauvaise qualité. L'infiltration des eaux saumâtres dans les égouts qui fuient (fait courant dans les villes côtières), l'utilisation d'adoucisseurs ou de produits ménagers, principales sources de sels, doivent également être limitées.

Au niveau de la station d'épuration de Lamzar à Agadir au Maroc, le rejet d'effluents issus de l'industrie du poisson (conserverie) dans le réseau des eaux usées entraîne un niveau élevé de salinité des eaux usées traitées réutilisées.

Adapter et améliorer les systèmes de traitement

Les systèmes de traitement doivent être adaptés à l'utilisation en aval (approche bottom-up).

Dans le district de Pikine à Dakar au Sénégal (Projet 7), les eaux usées brutes ont longtemps été réutilisées directement pour l'irrigation de cultures maraichères entrainant des problèmes de salinité du sol et des eaux souterraines. L'utilisation d'eaux usées traitées est prévue pour améliorer la situation.

Les traitements extensifs comme le lagunage ou les systèmes de zones humides pourraient se révéler inadéquats en région à climat sec où l'évaporation est élevée et conduit à des concentrations de polluants et de sels. Ils doivent être conçus en conséquence avec des temps de séjour de l'eau courts.

A Faisalabad au Pakistan (Projet 2), les agriculteurs considèrent à raison les eaux usées traitées par le système de lagunes trop salines pour l'irrigation. Ils préfèrent utiliser directement les eaux usées non traitées, contenant davantage d'éléments nutritifs et de matière organique.

Les technologies ayant une meilleure efficience de traitement sont considérées comme un moyen d'améliorer la qualité des eaux usées (à des coûts plus élevés), mais l'élimination des saumures (concentrats en sels) et des boues reste une préoccupation majeure. En utilisant la filtration sur membrane ou d'autres procédés de désalinisation, les décideurs seraient tentés d'utiliser l'eau pour des usages à plus haute valeur ajoutée que l'agriculture. Des volumes plus petits et plus concentrés en sels (les concentrats issus du traitement) sont alors difficilement valorisables par l'agriculture ou l'industrie, mais peuvent être transportés à plus faible coût sur de longues distances jusqu'à un point de rejet adapté (milieu salé, la mer).

Afin de prévenir la salinisation des terres et des masses d'eau dans un objectif de durabilité de la réutilisation, Israël pratique le dessalement partiel des eaux usées réutilisées en utilisant des procédés membranaires.

Mettre en œuvre des pratiques agronomiques et d'irrigation adaptées

a) Des pratiques culturales spécifiques pour limiter les impacts sur le sol

Un complément d'irrigation doit être appliqué pour assurer efficacement le lessivage des sols et drainer les sels hors de la zone des racines. Il est nécessaire de suivre alors le sol et l'eau souterraine sous-jacente (cf paragraphe ci-dessus). La lixiviation des sels peut aussi se combiner au lessivage des nitrates vers l'aquifère. Pour toutes ces raisons la **surveillance des eaux souterraines** sous-jacentes à des zones irriguées avec des eaux usées est un indicateur essentiel des performances environnementales des projets de réutilisation des eaux usées.

La structure des sols affectés par la salinité peut également être maintenue physiquement par des pratiques culturales spécifiques comme le travail du sol en profondeur, l'addition de résidus organiques, ou l'incorporation directe de gypse ou indirecte d'acide sulfurique avant le lessivage.

b) le changement d'assolement

Les assolements et les choix des cultures doivent être orientés vers des cultures tolérantes au sel sans quoi les rendements risquent d'être trop affectés. Les agriculteurs ont besoin d'identifier le niveau de perte de rendement acceptable. Un indicateur de l'impact de la salinisation pourrait être la perte de rendement par ha multipliée par le prix de vente des produits agricoles.

c) le choix du système d'irrigation

Les meilleures performances d'irrigation avec des eaux salées sont obtenues avec les techniques d'irrigation localisée (goutte à goutte). Des phénomènes de colmatage sont néanmoins susceptibles de se produire.

d) l'irrigation séquentielle et le choix de cultures adaptées

Les eaux de drainage sont souvent plus concentrées que les eaux d'irrigation. Les eaux de drainage collectées peuvent être utilisées dans différentes séquences culturales au fil de l'eau d'amont en aval, en commençant par exemple par des cultures sensibles au sel, puis des cultures tolérantes au sel et enfin des halophytes.

En Égypte (Pays 4), la salinité des eaux du Delta du Nil augmente d'amont en aval du delta en raison des rejets (contrôlés ou non) de drainage et d'eaux usées industrielles et domestiques traitées et non traitées. Les productions agricoles ont donc été adaptées : le riz, le blé et le maïs sont cultivés en amont tandis que l'aquaculture est la principale activité agricole dans la zone côtière.

e) Des essais pilotes avant la mise en œuvre à grande échelle

En cas de doute sur les impacts des sels des eaux usées sur les sols, les cultures, leur productivité, et sur l'environnement proche, une phase de test peut être menée localement sur des cultures, des sols et des sources d'eau spécifiques. Une étude à l'échelle pilote pourrait être mise en œuvre afin de dépasser les contraintes techniques liées à la gestion de la salinité. L'adaptation des cultures, des pratiques agronomiques et d'irrigation et le niveau de traitement pourraient alors être réfléchis et la réussite économique projetée, avant la mise en œuvre à grande échelle.

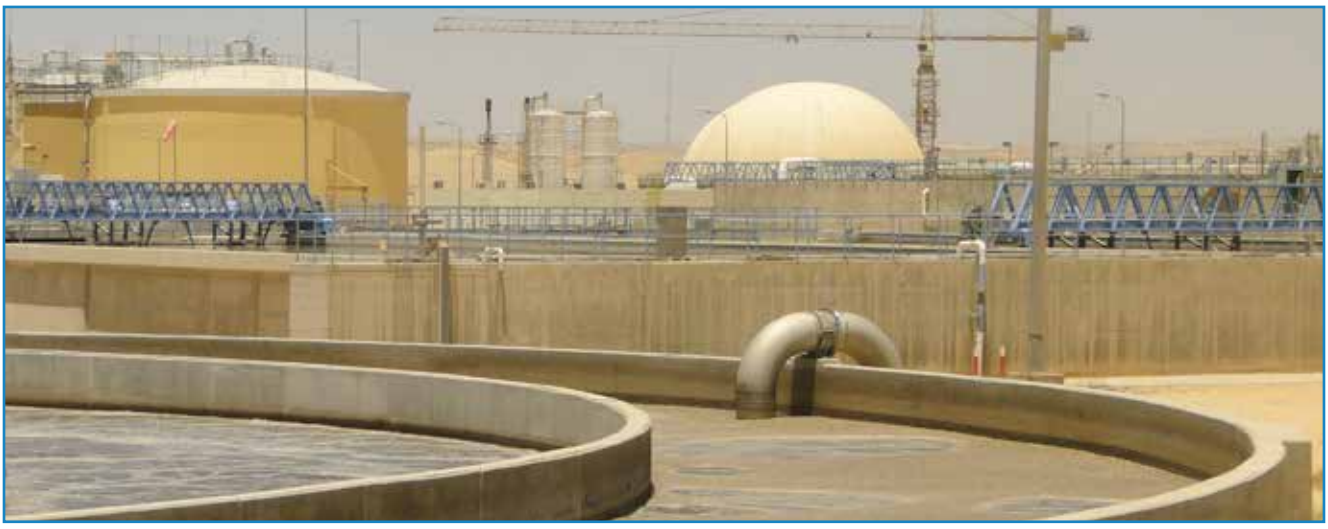
Utiliser une source de dilution intermédiaire

Mélanger les eaux usées avec une autre source d'eau peut être un moyen d'atteindre des niveaux de salinité acceptables pour l'eau d'irrigation.

La Jordanie (Pays 3) avait mis en place des lagunes de traitement pour les eaux usées dans un objectif de REUT. Les taux d'évaporation élevés dans les lagunes ont augmenté les niveaux de salinité des EUT. Les rendements agricoles dans la vallée du Jourdain ont ainsi diminué. La station d'épuration d'As-Samra a alors été construite en 2008 en utilisant boues activées classique, bassins d'aération prolongée et les lagunes sont conservées comme bassins de maturation (désinfection). Les EUT sont ensuite diluées dans la rivière Zerqua et dans le réservoir King Talal avant réutilisation indirecte agricole dans la vallée du Jourdain (Bashaar 2007).

A Korba en Tunisie (Projet 8) les eaux usées traitées étaient initialement trop salées pour pouvoir être directement réutilisées en l'agriculture. Une réutilisation indirecte après recharge des eaux souterraines et pompage a donc été mis en œuvre.

Une autre stratégie peut consister à utiliser les eaux usées en alternance avec une autre source d'eau. Toutefois, cela requière un doublement des systèmes de transport et une disponibilité des effluents commandée par le calendrier d'application par alternance.



Jordanie - Station As Samra © Condom, 2014

CHAPITRE 4

Quels processus politiques, organisationnels, institutionnels et réglementaires ?

Ce chapitre illustre plus particulièrement le contexte des pays du MENA.

Les sciences sociales ne se sont guère emparées, jusqu'à présent, de la question de la réutilisation des eaux usées traitées dans la région MENA. C'est le cas pour l'analyse des politiques publiques en particulier. Les réflexions sur les dimensions politico-institutionnelles de la réutilisation sont le plus souvent restées confinées à quelques pages dans des rapports internationaux (voir par exemple : PNUE, 2003 ; USAID, 2004). Lorsque les analystes ont abordé ces dimensions plus longuement (OMS, 2006), ils se sont contentés de décrire les architectures institutionnelles existantes et d'identifier quelques blocages réglementaires généraux. En conséquence, les recommandations ont eu tendance à être génériques et procédurales (pour préconiser par exemple une répartition plus claire des prérogatives, ou demander une consultation précoce avec toutes les parties prenantes).

Ce qui a fait défaut, en revanche, ce sont des analyses de la construction des politiques de réutilisation des eaux usées traitées. Ce n'est pourtant qu'en nous penchant sur le policy-making concret, c'est-à-dire sur les interactions entre décideurs ayant des intérêts et des représentations hétérogènes, que nous serons en mesure de faire des recommandations de politiques publiques réalistes, et donc susceptibles d'avoir un certain effet. Le point de départ est de reconnaître que la réutilisation des eaux usées traitées, malgré les nombreux avantages qu'elle doit apporter, est un problème autant politique que technique. Elle est en concurrence avec d'autres solutions à la pénurie d'eau ; elle réorganise des périmètres administratifs ; elle réaffecte des coûts et des bénéfices; elle peut déstabiliser des routines et des manières de faire existantes; sa mise en œuvre nécessite des ajustements créatifs et une autorité « pratique» permettant de résoudre les problèmes à mesure qu'ils surviennent (Abers & Keck, 2013). En bref, faire de la réutilisation des eaux usées traitées un objet de politique publique est nécessairement un processus désordonné marqué par des incertitudes.

En raison de la rareté des recherches sur les politiques de réutilisation, et leur dimension politique, cette section vise non seulement à présenter quelques faits politiques, institutionnels et réglementaires pour la région du MENA, mais aussi à esquisser quelques questions de recherche qui devraient être mieux traitées dans le futur. Elle attire l'attention sur six questions en particulier : (1) le passage, qui est tout sauf automatique, entre la mise à l'agenda de la réutilisation et l'adoption de projets concrets ; (2) les dynamiques complexes d'adoption des projets ; (3) les héritages préexistants : (4) le processus de réglementation et les compromis ; (5) les difficultés de la mise en œuvre et (6) et l'économie politique de la réutilisation.

DE LA MISE À L'AGENDA À L'ADOPTION DE PROJETS : UN PROCESSUS INÉGAL DANS LA RÉGION DU MENA

Dans son ouvrage classique, John Kingdon (1984) a examiné comment certains problèmes en viennent à capter l'attention des gouvernements. Sa théorie comprend trois volets distincts, mais faiblement reliés entre eux - le courant des « problèmes », le courant des « solutions » et le courant de la politique - qui doivent converger afin d'ouvrir une « fenêtre d'opportunité» pour une réforme. Cependant, Kingdon expliquait que l'ouverture d'une telle fenêtre implique seulement que différentes options soient discutées et que certaines décisions soient envisagées : il n'est pas évident qu'une fenêtre débouche sur l'adoption de projets spécifiques. Il n'existe pas de chemin direct entre la mise à l'agenda et les décisions politiques. Souvent le changement est manqué de peu : « il est possible, envisagé, activement recherché, mais ne parvient pas à se matérialiser » (Capoccia, 2015, p165).

Dans le cas de la réutilisation des eaux usées traitées, une confluence des trois courants peut certainement être observée dans la plupart des pays du MENA. Selon Kingdon, le « courant des problèmes » désigne l'identification de problèmes particuliers – par des événements marquants ou de nouvelles mesures.,. Ici, la sociologie des problèmes sociaux (Hilgartner & Bosk, 1988) a insisté sur le fait que, dans de nombreux cas, ce n'était pas un seuil objectif de gravité qui déclenchait la réaction du gouvernement à un problème. Au contraire, de nombreuses activités sociales complexes sont nécessaires, dont la production par les scientifiques et les experts de données, d'indicateurs, de schémas de causalité et de scénarios pour l'avenir. En ce qui concerne les eaux usées traitées, deux problèmes distincts ont attiré l'attention des pouvoirs publics. Le premier est la diminution constante de la disponibilité en eau par habitant en raison de la diminution des précipitations, le développement économique, l'urbanisation et la croissance démographique. Cette tendance alarmante a été de plus en plus documentée et médiatisée avec l'usage de l'indicateur de Falkenmark et ses seuils de rareté ou de stress hydrique (pour un exemple récent : WRI, 2015). Le second a été plus récemment érigé en problème social : il s'agit de la réutilisation incontrôlée des eaux usées brutes dans les zones péri-urbaines. Ici aussi, les scientifiques et les experts ont joué un rôle clé pour faire connaître le problème, conformément au modèle classique de mise à l'agenda par "anticipation" (Garraud, 1990). Ils ont rendu visible, par exemple, le fait qu'en Égypte, les eaux de drainage mélangées à l'eau « douce » du Nil et à des eaux usées, sont intensivement réutilisées en aval à plusieurs fins, y compris l'irrigation des cultures. Des systèmes de réutilisation à petite échelle pour les eaux grises ou bayaras (réservoirs sceptiques) sont également développés dans les zones rurales où l'extension de la couverture des réseaux de traitement de

l'eau et des stations d'épuration n'est pas planifiée pour les prochaines décennies. Au Maroc, c'est en 2009 qu'il a été quantifié que 7.200 ha de cultures étaient irrigués avec des eaux usées non traitées dans les zones péri-urbaines (à Marrakech, Meknès, Oujda ou Fès).

Le courant des solutions, ou des politiques publiques, désigne l'ensemble des options envisageables par les décideurs à un moment donné. Certains acteurs doivent alors transformer des idées vagues, des grands principes, en solutions techniquement faisables, économiquement supportables et politiquement acceptables. Ce processus a lui-aussi été largement couronné de succès, et la réutilisation des eaux usées traitées est maintenant largement perçue comme une solution crédible aux problèmes précédemment mentionnés. Elle est en particulier considérée comme un moyen de capitaliser sur le processus d'urbanisation, et de réduire les pressions sur les ressources en eau de bonne qualité, tout en satisfaisant les besoins organiques et minéraux de certaines plantes. Les discussions politiques portent désormais moins sur le pourquoi de la réutilisation des eaux usées, que sur la manière dont elle devrait être encouragée.

Enfin, le courant politique se réfère aux priorités d'action énoncées par les acteurs politiques tels que les ministres et leurs cabinets. Ici, les décideurs doivent trouver à la fois les motifs et l'opportunité de choisir, parmi les problèmes sociaux et les solutions politiques en concurrence, un « couple » problème-solution et le transformer en politique. Ils confrontent leurs propres convictions à leur perception de l'opinion publique et aux commentaires qu'ils reçoivent de divers groupes d'intérêt. Cet aspect de la mise à l'agenda politique est basé sur des considérations de revendication du crédit, d'évitement du blâme et de concurrence politique.

La réutilisation des eaux usées traitées a donc été mise presque partout à l'agenda législatif et gouvernemental, même si dans la plupart des pays, le cadre juridique est encore largement considéré comme incomplet. Les stratégies nationales de l'eau et les lois sur l'eau font référence à la réutilisation des eaux usées. Elles autorisent l'État à subventionner des projets. Les pays diffèrent cependant largement dans leur propension à traduire cette ambition générale en projets spécifiques.

Faire en sorte que ces courants se connectent, et d'une manière durable, est souvent la tâche d'entrepreneurs politiques spécifiques (Kingdon, 1984). Il serait donc important d'avoir une vision plus précise de qui sont exactement ces entrepreneurs de réforme dans la région du MENA, quels sont leurs points de vue spécifiques sur la réutilisation des eaux uses traitées et la manière dont ils peuvent participer à sa diffusion. Il n'y a eu jusqu'à présent aucune étude sociologique sur cette dimension. Plus généralement, si la réutilisation des eaux usées traitées a été mise à l'agenda dans la plupart des pays de la région, elle ne l'a sans doute pas été partout grâce aux mêmes acteurs-relais, au travers des mêmes processus politiques et avec la même intensité. Cela justifierait des études comparatives sur la manière dont s'est effectuée cette inscription à l'agenda dans les différents pays, et pour quelle qualité finale (degré effectif de priorisation).

Au-delà, cependant, les pays du MENA diffèrent largement dans leur capacité à transférer cet intérêt commun en des décisions politiques spécifiques. À une extrémité, par exemple, la Jordanie réutilise près de 85% de ses eaux usées traitées. Toutes les eaux usées traitées recueillies dans les deux principales villes (Amman et Zarqa) sont mélangées avec de l'eau douce et utilisées pour l'irrigation sans restriction dans la vallée du Jourdain. Dans une position intermédiaire, la Tunisie a développé la réutilisation des eaux traitées depuis plus de 30 ans : aujourd'hui, environ 24% des eaux usées traitées sont réutilisées pour l'agriculture irriguée, pour l'arrosage de tous les terrains de golf tunisiens, et de 3.000 ha de cultures et les forêts, en 2009. En revanche, le Maroc semble être à la traîne, même s'il rattrape lentement son retard maintenant que de nombreuses stations d'épuration, pour la plupart utilisant les procédés de traitement par lagunage, sont en construction dans les villes moyennes.

Tenir compte de ces différentes trajectoires est donc une tâche cruciale. Cela exige d'aller au-delà de la mise à l'agenda et de regarder les dynamiques politiques et institutionnelles qui façonnent l'adoption des projets.

LES DYNAMIQUES D'ADOPTION DES PROJETS

De nombreux experts ont tendance à analyser l'adoption de projets de réutilisation des eaux usées traitées en termes fonctionnalistes, de stimulus-réponse. Dans cette perspective, l'approfondissement de la crise hydrique conduit naturellement à la réutilisation. La Jordanie et Israël, deux des pays les plus déficitaires en eau dans la région et aussi deux précurseurs dans le domaine, semblent confirmer cette tendance.

Cependant, l'analyse de la politique nous dit que des « pressions adaptatives » similaires conduisent rarement à des réponses politiques identiques (Radaelli, 2003). Premièrement, les décideurs politiques ont une rationalité limitée : leurs préférences sont multiples, souvent contradictoires, façonnées par des idées et des représentations. Ensuite, la prise de décision est le produit de multiples acteurs en interactions complexes. L'adoption d'un projet nécessite donc l'assemblage d'une coalition entre des acteurs aux priorités différentes (Hall, 2009). Nous devons donc comprendre comment les acteurs individuels forment leurs préférences par rapport à la réutilisation des eaux usées traitées, et comment ils prennent part (ou non) à la construction de coalitions.

Cette question est d'autant plus ardue dans le cas de la réutilisation des eaux usées traitées que, comme les politiques environnementales en général, il s'agit d'un enjeu peu "sectorisé" : la définition des acteurs impliqués a donc de fortes chances de faire déjà l'objet de controverses (Lascoumes & al. 2014). Fondamentalement, ces acteurs couvrent également plusieurs niveaux d'action, et n'incluent évidemment pas que des acteurs publics. Parmi ces derniers, toutefois, la liste des « invités » potentiels est déjà longue, qui comprend au moins :

- Les sociétés locales d'eau et d'assainissement.
- Les gouvernements locaux généralement officiellement responsables de l'assainissement.
- Le ministère chargé de l'eau et de l'environnement, et son administration locale.
- Le Ministère de l'agriculture et son administration locale (responsable, entre autres, de la planification des programmes de développement de l'irrigation et de la gestion des périmètres irrigués).

- les Agences de l'eau, dont beaucoup doivent autoriser le rejet des eaux réutilisées à des fins spécifiques.
- Les bailleurs de fonds internationaux qui contribuent financièrement aux projets et font des études.
- Le ministère de la Santé qui doit surveiller le respect des normes de qualité et faire la veille sanitaire.
- Le ministère des Finances qui gère la fiscalité des établissements publics et édicte les normes de marchés publics.
- Le ministère des Affaires économiques qui participe à la régulation des tarifs.
- L'organe en charge de la sécurité alimentaire, qui jouit généralement d'un degré important d'autonomie par rapport aux ministères de la santé ou de l'Agriculture.
- Les instituts de recherche publics en hydrologie, biologie et agronomie.

Dans de nombreux pays, le ministère de l'Intérieur est également susceptible de jouer un rôle important. Au Maroc, c'est lui qui coordonne le Plan national d'assainissement (PNA) en collaboration avec le ministère de l'Environnement. Il fournit également un soutien technique direct à de nombreux opérateurs locaux de l'eau.

Le processus de sélection et de définition des projets implique de nombreux acteurs non publics : organisations d'irrigants, et d'usagers urbains, sociétés de conseil et bureaux d'études, experts nationaux et internationaux, gestionnaires privés de STEP et sous-traitants. Nous avons donc besoin d'en savoir plus sur la façon dont tous ces acteurs publics et privés forment leurs préférences et interagissent : ces interactions sont-elles plus ou moins institutionnalisées ? Au contraire, les négociations ad hoc (ou l'imposition) prédominent-elles ?

Parmi les nombreux clivages susceptibles de caractériser la réutilisation des eaux usées traitées le clivage urbain / rural peut être le plus profond. Il faut ainsi noter que les exigences de réutilisation ne sont pas toujours compatibles avec les intérêts à court terme des entreprises d'assainissement, ou même des municipalités. La réutilisation est coûteuse et souvent plus exigeante, au moins pour certains paramètres, que le traitement secondaire habituel. La planification de la réutilisation peut également conduire à opter pour une filière de traitement différente.

Par conséquence, les stations de traitement sont généralement construites avec peu de considération pour les options de réutilisation. Dans de nombreux pays comme au Maroc, la plupart des projets d'assainissement n'intègrent pas la réutilisation dans la planification amont. Les options de réutilisation des eaux usées traitées ne sont considérées que tardivement, avec toutes les contraintes entraînées par le fait accompli. Le rejet des eaux peut donc se produire loin des zones potentielles de réutilisation ou en des points bas qui contraint alors à un imposant pompage avant la réutilisation.

Clarifier les responsabilités ?

En matière de politique publique, les prérogatives ont tendance à se chevaucher et à être interprétées différemment par les différents acteurs. Les vagues appels à "l'intégration des politiques" ne font pas disparaître le problème. Toutefois, cela ne devrait nous empêcher en aucune façon de réfléchir, comme beaucoup l'ont déjà fait, sur les moyens de clarifier les prérogatives, pour construire des modèles d'interaction plus stabilisés et pour forger des mécanismes plus consensuels de règlement des différends. Le Maroc, par exemple, revendique avoir réussi à établir des protocoles d'accord liant les partenaires, et à préciser leurs responsabilités et leurs rôles, dans divers projets tels que Settat, Tiznit ou Guelmim. Il serait intéressant d'en savoir plus sur ces protocoles et la manière dont ils ont été élaborés.

Certains ont demandé d'envisager la possibilité de mettre en place un comité interministériel permanant sous l'égide d'un ministère (Ministère de l'agriculture ou des ressources en eau), ou peut-être comme une organisation distincte (bénéficiant à la fois de financements publics et privés). Ce comité serait responsable de la planification nationale, de la coordination des programmes, de la production d'informations de qualité et de la conformité aux normes en vigueur.

Des comités techniques pourraient être également mis en place au niveau local pour chaque projet. Dans la ville de Ouarzazate au Maroc, le projet de réutilisation s'est déployé grâce à un « comité technique local pour la surveillance du projet" (CTLSP). Le CTLSP a été créé sous les auspices des autorités locales avec la participation des services techniques provinciaux. Ses membres se réunissent sur une base régulière. La perspective d'un tel comité inclusif peut être décisive pour l'adoption du projet, du fait que tous les acteurs peuvent alors être persuadés qu'ils auront une voix dans le processus de mise en œuvre et ne seront pas marginalisés.

Cependant, il ne suffit pas de souligner certains déterminants généraux des décisions de réutiliser l'eau traitée. Ce qui importe est également de comprendre les déterminants des variations locales et nationales dans le contenu des projets. Comment les décideurs politiques prennent-ils en compte les spécificités institutionnelles, géographiques et agricoles locales dans leurs décisions ? Comment expliquer par exemple le fait que la Tunisie, soit parvenue à mobiliser la réutilisation d'eaux usées traitées pour la réhabilitation de zones humides et la recharge des nappes, beaucoup plus que d'autres pays de la région MENA ?

Il reste beaucoup à comprendre dans le processus de prise de décision. Il serait nécessaire de se plonger dans des projets spécifiques afin de mieux comprendre les mécanismes de décision. Au Maroc, par exemple, les projets de Settat (300 ha de maïs, de blé et d'oliviers irrigués) et de Marrakech (arrosage de terrains de golf) pourraient être des études de cas intéressantes.

LA STRUCTURATION DES POLITIQUES DE RÉUTILISATION : HÉRITAGES ET ROUTINES

Certains courants de science politique ont insisté sur la façon dont les jeux d'acteurs sont fortement façonnés par des institutions (formelles et informelles) qui ont pu être crées dans d'autres contextes, longtemps auparavant (Steinmo, 1992; Thelen et Mahoney, 2010). Dans le cas de la réutilisation des eaux usées traitées, nous savons remarquablement peu de choses sur ces héritages et la façon dont ils peuvent limiter ou faciliter l'adoption du projet. Ces legs peuvent être bureaucratiques. Dans de nombreux pays de la région

MENA les administrations urbaines et agricoles ont pris des chemins différents, avec différents corps d'ingénieurs à leur barre et peu de contacts entre eux.

Des legs cognitifs peuvent être imbriqués dans ces legs bureaucratiques. Au Maroc, par exemple, la construction de barrages et la gestion quantitative de l'eau ont été la priorité absolue à partir des années 1960. Les eaux usées sont donc restées hors du champ de vision des fonctionnaires, même si les eaux usées non traitées ont été sur le terrain de plus en plus mobilisées par l'agriculture périurbaine, parallèlement au phénomène d'urbanisation.

L'héritage d'autres priorités politiques peut avoir engendré un manque de connaissances et de sensibilité sur les effets et les risques des eaux usées, qui peuvent également poser de nouveaux obstacles à l'adoption. Ainsi, selon le ministère de l'eau au Maroc, de nombreux fonctionnaires de l'eau et de l'agriculture ne disposent pas des connaissances suffisantes sur les risques environnementaux posés par les eaux usées, tels que les effets sur la structure des sols, sur la salinité des eaux souterraines ou les risques pour la santé (risques chimiques, épidémiologiques microbiologiques). Ils reconnaissent également être peu au courant des exigences en matière de surveillance et de contrôle (Royaume du Maroc, 2011).

RÉGULER LES RISQUES : UN PROCESSUS CONTINU ET TÂTONNANT

Si la mention de la réutilisation des eaux usées traitées comme une solution potentielle dans une loi et / ou une stratégie nationale de l'eau peut être le signe d'une attention accrue des autorités publiques, ces textes ne prévoient généralement qu'un cadre général. C'est au niveau de la réglementation que les choix cruciaux sont discutés et tranchés, choix qui façonneront directement la structure des coûts et des bénéfices des acteurs économiques.

La réglementation doit couvrir une quantité vertigineuse de sujets, touchant à la fois les produits (nourriture et eau) et les process. Elle peut être divisée en trois catégories : les normes techniques, les incitations économiques et les droits de propriété. Cette distinction n'est qu'un outil de clarification, puisque de nombreuses normes techniques sont également de facto des incitations économiques et des droits de propriété. Les normes techniques définissent les normes de construction, les processus de traitement des eaux, les valeurs maximales des paramètres de qualité des eaux usées, les restrictions sur les produits pour raisons de santé et de sécurité, les méthodes d'application, les distances minimales entre les zones irriguées avec des eaux usées traitées et les activités ou les environnements à protection, l'hygiène alimentaire et les méthodes de surveillance.

Les incitations économiques comprennent les tarifs acquittés par les usagers urbains pour l'épuration des eaux usées, ainsi que les diverses subventions publiques, incitations ou pénalités financières. Ces dernières peuvent être imposées aux entreprises et aux particuliers pour sanctionner des pollutions ou des comportements à risques pour la santé et l'environnement.

Enfin, les droits de propriété sont ceux sur les eaux usées, y compris les droits d'usage. Ils peuvent inclure les droits de propriété sur le foncier.

Tout comme pour les autres enjeux, nous sommes également confrontés à un manque d'études détaillées sur le processus de réglementation, a fortiori dans une perspective comparative. Il y a une forte dimension de transfert international de bonnes pratiques à cette question (Dolowitz & Marsh, 2000), dans la mesure où les lignes directrices de l'OMS visant à faciliter le commerce international sont désormais une source d'inspiration commune. Les questions auxquelles il faudrait mieux répondre sont notamment : dans quelle mesure les normes et les standards adoptés reflètent-ils directement la vision et les intérêts de certains acteurs dominants ? Au contraire, dans quelle mesure sont-ils le produit de larges compromis basés sur des concessions mutuelles ? Les normes techniques évoluent-elles (ou non) avec les progrès de la connaissance scientifique ? Comment expliquer la persistance des vides et des ambiguïtés réglementaires ?

Parmi les praticiens, trois problèmes en particulier semblent se démarquer. Le premier, classique, est le niveau approprié d'exigence des normes. Ce niveau dépend de ce qui est admis comme un « risque acceptable », qui peut être chaudement débattu. Au Maroc, par exemple, les normes de qualité de l'eau d'irrigation sont très restrictives en termes de qualité pour les catégories A et B sur les nématodes intestinaux et les œufs d'helminthes : elles exigent leur absence totale dans 1 litre, par rapport à celles recommandées par l'OMS qui sont moins strictes : <1 par litre. Ici, l'adoption de normes élevées peut être un moyen de signaler l'engagement des autorités publiques de minimiser les risques. Alors que certains critiqueront ce néo-hygiénisme (Aggeri, 2005), d'autres le loueront au contraire comme une application bienvenue du principe de précaution.

Des normes élevées ont des conséquences pratiques. En Tunisie, la réutilisation des eaux usées traitées est interdite pour les cultures à forte valeur ajoutée comme les légumes, ce qui conduit les agriculteurs à revenir vers les ressources en eau conventionnelles, pourtant plus chères. En Égypte, la règlementation actuelle est très restrictive et limite la réutilisation d'eau traitée à l'irrigation des plantations d'arbres. La prochaine révision devrait inclure l'irrigation des cultures et la recharge de nappe.

Un autre pan de la controverse est la question de savoir qui devrait avoir le pouvoir de réglementer quoi. Par exemple, dans quelle mesure les gouvernements locaux pourraient être en mesure de délivrer des permis, de mener des inspections et d'établir des restrictions sur les cultures autorisées ? Qui devrait avoir la capacité de délivrer des permis pour l'utilisation des eaux usées à partir d'un réseau public de distribution dans le secteur agricole ?

Une troisième ligne de débat concerne la diversification des normes. Dans quelle mesure les normes devraient être différenciées selon les types d'utilisation ? Certaines distinctions sont faites un peu partout. Par exemple, les cultures consommées crues (fruits et certains légumes) ou les zones ouvertes au public sont soumises à des normes de qualité plus exigeantes que les cultures consommées après transformation

ou destinées à des utilisations non alimentaires (horticulture). Mais tous les pays ne définissent pas comme la France quatre catégories d'utilisation.

Ces débats ne font que compliquer encore un processus qui est déjà entravé par une grande complexité technique et scientifique. Réguler les risques est donc un processus long et difficile. Même un précurseur comme la Jordanie doit encore transformer de nombreuses lignes directrices en normes efficaces et en valeurs-seuil spécifiques. Mais presque tous les pays du MENA ont encore des règlements largement incomplets et souvent, en partie, contradictoires. Tel est le cas du Maroc, en particulier en ce qui concerne les obligations des gouvernements et des utilisateurs locaux, la réglementation des tarifs et l'exploitation des installations, la surveillance des rejets, la gestion des boues et les sanctions pour non-respect des normes en vigueur (y compris les rejets industriels).

LES DIFFICULTÉS DE MISE EN ŒUVRE : CAPACITÉ, COMPLEXITÉ, CONSENTEMENT

Que la mise en œuvre soit toujours porteuse d'effets non intentionnels et de dérivation créative est admis depuis bien longtemps (Pressman & Wildawsky, 1973). Tel est nécessairement le cas parce que les règlements sont toujours insuffisamment spécifiques et ambigus : l'application hiérarchique doit donc être complétée par des ajustements informels (Hill & Hupe, 2002). De plus, la mise en œuvre voit de nouveaux acteurs prendre de l'importance, tels que les gestionnaires et les ingénieurs locaux, qui doivent être incorporés dans le jeu.

Le manque de moyens spécifiques dédiés à la mise en œuvre de programmes est aussi un trait récurrent, mais qui prend des proportions particulières dans des États faiblement bureaucratisés comme ceux du MENA. L'absence de ressources suffisantes peut être aggravée par des normes particulièrement élevées de surveillance, initialement conçues pour signaler un engagement fort vis-à-vis de la réduction des risques. Au Maroc, par exemple, le nombre minimal d'échantillons nécessaires aux eaux usées traitées est de 4 par an pour les métaux lourds, mais de 24 par an pour quinze paramètres bactériologiques, parasitologiques et physicochimiques.

Dans le cas spécifique de la réutilisation des eaux usées traitées, la surveillance est aussi intrinsèquement difficile en raison de la nature de la pollution en jeu : plutôt que massive et visible, elle est le plus souvent diffuse, mettant en jeu des doses infinitésimales de polluants chimiques. La ligne de démarcation entre le « normal » et le « pathologique » devient donc particulièrement difficile à établir (Aggeri, 2005).

Nous ne devrions cependant pas nous contenter de déplorer les écarts entre les règles et leur application. Il est aussi intéressant de regarder directement et sans idées préconçues les pratiques effectivement existantes sur le terrain, comme de nombreuses recherches l'ont faites (Lipsky, 1980 ; Dubois, 2008). Nous avons besoin de quelques études fines sur la manière dont la surveillance sanitaire et environnementale fonctionne concrètement, sur la manière dont les acteurs publics, privés et sociaux interagissent dans leur routine quotidienne, et sur la manière dont ils règlent leurs micro-conflits.
Nous avons également besoin de comparer la mise en œuvre dans divers pays. Si, par exemple, la Tunisie a effectivement pris plus de mesures que tous les autres pays de la région pour atténuer les risques environnementaux et sanitaires, nous avons besoin de comprendre pourquoi.

Produire le consentement

Une autre question clé liée à la mise en œuvre des projets a trait au consentement des agriculteurs locaux. Ici, nous devons prendre en compte non seulement les bénéficiaires directs des projets, mais aussi tous les agriculteurs susceptibles d'être affectés, directement ou indirectement (les « ressortissants » du projet). Nous avons besoin de recherches qui analysent l'évolution des relations entre les autorités publiques locales et les agriculteurs locaux, la façon dont les premiers parviennent à structurer l'action des derniers et avec quelle légitimité. Nous avons également besoin d'enquêtes « d'en bas » sur la façon dont les agriculteurs perçoivent des projets spécifiques et la restructuration politique et économique qu'ils entraînent. Est-ce qu'ils considèrent également « acceptable » le prix à payer, en particulier pour ceux qui ont utilisé auparavant des eaux usées (non traitées) auparavant ? Quelle est, en particulier, l'attitude des associations d'usagers ?

Nous en savons très peu sur ces questions dans la région du MENA. Au Maroc, il semble que la concurrence avec la libre utilisation de l'eau conventionnelle, combinée à l'efficacité limitée des installations de traitement, a été responsable de l'échec de plusieurs projets de réutilisation de l'eau, en particulier dans les petites collectivités. En Jordanie, de nombreux prélèvements illégaux se produisent encore entre la station d'épuration et les réservoirs où les eaux sont diluées.

C'est un fait, en tous cas, que l'absence de consentement a déjà provoqué des conflits ailleurs. Au Pakistan, de nombreuses poursuites ont été entreprises par des entreprises d'eau locales contre les agriculteurs, compromettant la réutilisation (illégale) des eaux usées. À la suite des procès, les agriculteurs ont été contraints de payer pour disposer des eaux usées, ou de renoncer à leur utilisation, suscitant le mécontentement. Dans la ville de Faisalabad, cependant, un groupe d'agriculteurs utilisant des eaux usées a gagné un recours contre l'un de ces jugements, après avoir prouvé qu'ils n'avaient aucun accès à une autre source d'eau appropriée (Ensink et al, 2004).

Pour tenter d'atténuer les écarts de la mise en œuvre, les responsables politiques ont souligné la nécessité d'améliorer les programmes d'information et d'éducation, de manière à générer plus d'adhésion des agriculteurs (et de la population en général) pour les efforts de développement de l'assainissement. Beaucoup ont aussi souligné la nécessité d'une meilleure participation des communautés locales dans la conception et la mise en œuvre des politiques, par exemple en Tunisie et en Jordanie. Il pourrait être intéressant d'analyser ces « politiques discursives » (Schmidt, 2008) visant à produire de l'acceptation sociale.

Maroc - Dispositif expérimental de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II pour la REUT © Condom, 2015

L'ÉCONOMIE POLITIQUE DE LA RÉUTILISATION

L'économie politique de la réutilisation des eaux usées traitées s'intéresse au « qui paie quoi, et avec quel niveau d'acceptation ». Ce n'est pas une tâche facile, car les externalités (positives et négatives) sont omniprésentes et difficiles à mesurer. Comment évaluer les externalités positives telles que la réduction de la dégradation de la qualité de l'eau, la diminution des risques de santé et des apports additionnels en nutriments ? Les gains économiques potentiels dépendent également de la disponibilité et du coût de la mobilisation des ressources en eau conventionnelles, et du niveau général de stress hydrique.

En règle générale, cependant, il est presque impossible de recouvrer les coûts de traitement tertiaire et de suivi par la seule vente d'eau. Les projets doivent donc être subventionnés, et d'une manière telle que les prix seront compétitifs pour les agriculteurs. Au Maroc, par exemple, les coûts engendrés par la partie amont des projets de réutilisation (travaux supplémentaires pour le traitement des eaux usées par rapport au niveau secondaire, fonctionnement, entretien, essais, etc.) vont généralement de 2,02 à 2,40 DH / m^3 d'eau usée traitée, selon le taux d'actualisation qui est utilisé.
Là encore, nous retombons sur les questions de normes de surveillance, étant donné que la fréquence des analyses et des mesures génère des coûts élevés qui doivent être payés par quelqu'un.

Au-delà, le principal problème est celui de l'absence de critères institutionnalisés pour l'allocation des coûts (et des bénéfices). Au contraire, la répartition tend à faire sur une base ad hoc pour chaque projet, selon les négociations les rapports de force. Israël fait exception avec sa politique nationale de péréquation.

CHAPITRE 5

Quels outils et quelles méthodologies pour évaluer et décider ?

INTRODUCTION

La réutilisation des eaux usées pose des questions multiples et complexes. L'évaluation et l'intégration des différentes composantes d'un projet (voir équation de durabilité en Figure 2) nécessitent des outils spécifiques d'aide à la décision et des méthodologies intégratrices. L'absence d'outils de ce type constitue la limite principale pour le développement et le déploiement massif des projets de réutilisation.

Des **approches multi-impacts et multi-sectorielles** adaptées aideraient les décideurs et les gestionnaires dans l'évaluation de la **durabilité des projets** et dans l'identification et la sélection des meilleures options de réutilisation à mettre en œuvre.

Un cadre méthodologique, consistant en un plan d'étapes (Figure 19 ci-dessous) et une checklist (Tableau 15 du Plan Bleu n°11), pour l'évaluation du projet a été développé dans le Plan Bleu n°11 (Condom 2012)[1]. Il vise à aider les gestionnaires à mettre en place leur projet de réutilisation des eaux usées traitées, étape par étape, et à compiler les informations nécessaires pour répondre aux questions clés amont à la mise en œuvre du projet. Une fois les réponses obtenues, la checklist devient un outil de prise de décisions et de partage de l'information. Elle constitue également un support de travail en commun pour tous les acteurs impliqués dans le projet.

Les outils de suivi et de fonctionnement, après mise en place d'un projet de REUT, n'ont pas été identifiés et doivent être mis au point.

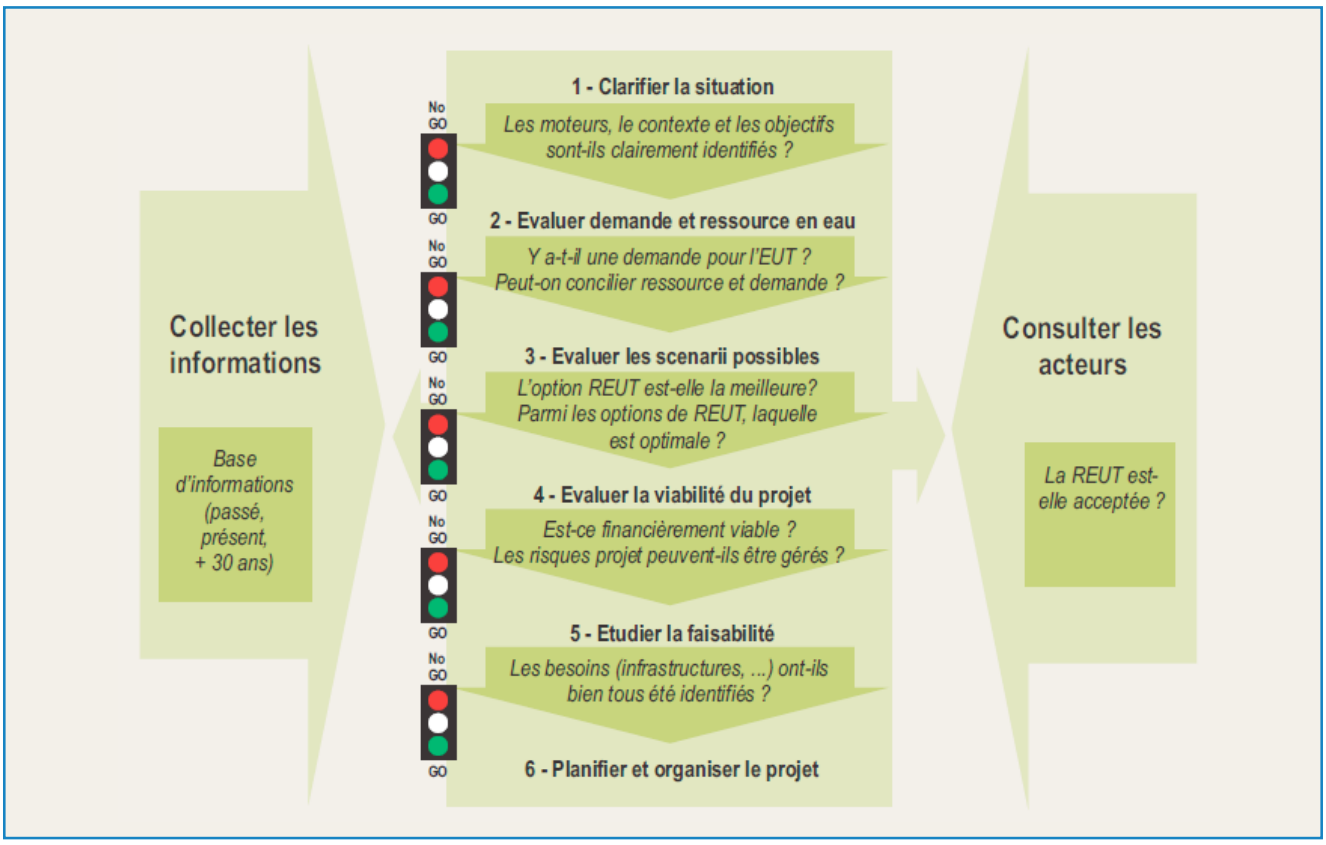
Les outils et les méthodologies décrits dans ce chapitre sont des outils d'évaluation. Ils doivent être utilisés et exécutés en amont de la mise en place des infrastructures pour assister à la définition et au choix du projet. Différentes options de réutilisation des eaux usées et de non-réutilisation peuvent être comparées, en termes d'impacts sur l'environnement, l'économie et la santé. Le pré-dimensionnement des différentes options est préalablement souvent nécessaire pour réaliser ces évaluations : des outils spécifiques de dimensionnement (traitement, réseau, systèmes d'irrigation, et surfaces irriguées) existent déjà pour tous les composants de la filière de réutilisation des eaux usées.

Les outils et les méthodologies les plus courants et les plus intégrateurs dans le domaine du traitement des eaux usées et de la réutilisation pour intégrer les risques économiques, environnementaux, et sur la santé, sont principalement :

- l'Etude d'impact environnemental (EIE) ;
- l'Evaluation des risques ;
- l'Analyse coût-bénéfice (ACB) ;
- l'Analyse du cycle de vie (ACV), méthodologie émergente ayant un potentiel d'application large et une grande utilité dans le domaine de la réutilisation des eaux usées.

1 - https://planbleu.org/sites/default/files/publications/cahier11_reut_en.pdf

FIGURE 19 : Grandes lignes de l'évaluation d'un projet de réutilisation d'eaux usées traitées – Plan Bleu n°11



DONNÉES ET INDICATEURS

Compléter des bases de données libres

Sato et al., 2013 a mis en évidence que les données fiables sur les eaux usées étaient limitées et manquantes malgré les prévisions d'augmentation du marché de la REUT dans le monde (des retours d'expériences, des données sur les caractéristiques de l'eau, sur les pratiques culturales, etc.) (Sato 2013). L'élaboration d'un cadre pour collecter, stocker et analyser les données est nécessaire pour partager les retours d'expérience.

Identifier et définir les indicateurs

Les différents outils d'évaluation utilisent des indicateurs spécifiques. Ils permettent de faciliter le processus de prise de décision, en simplifiant ou en résumant les propriétés essentielles, en représentant les phénomènes d'intérêt, en quantifiant, mesurant et communiquant les informations pertinentes (Gallopin 1997). Les indicateurs utilisés pour évaluer la durabilité de projets de réutilisation des eaux usées ont été décrits dans le Plan Bleu n°11 (Condom 2012). Néanmoins, ils doivent à chaque fois être adaptés au cahier des charges de chaque projet car leur utilisation dépend des facteurs liés au territoire géographique, à son contexte environnemental, à la culture de la communauté, aux utilisateurs finaux, et aux autres parties prenantes.

L'ANALYSE COÛT/BÉNÉFICE, UN OUTIL D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

Les cadres méthodologiques pour les évaluations économique (ACB sociale) et financière (ACB privée) adaptées aux projets de réutilisation des eaux usées traitées sont brièvement décrits ci-dessous et plus particulièrement détaillés dans le document du Plan Bleu n°11 (Condom 2012).

L'analyse économique est utilisée pour décider si un projet doit être mis en œuvre et pour déterminer s'il est économiquement justifié, c'est-à-dire, si les bénéfices dépassent les coûts (Condom 2012). Les Analyses Coût/Bénéfice (ACB) économique et financière sont deux étapes d'analyse d'un projet de réutilisation des eaux uses traitées. Les coûts et bénéfices sociaux, les externalités environnementales et les impacts sur la santé humaine peuvent être appréhendés (processus d'identification et de monétisation) au sein d'une ACB sociale. Le but d'une analyse financière est de déterminer si un projet peut être financé et comment. L'analyse financière se penche sur les structures de financement par le biais de l'ACB privée (Condom 2012). Elle cherche à identifier des mécanismes de financement adéquats (des tarifs de l'eau adaptés, la mise en place de subventions, etc.). L'investissement, l'exploitation et les flux financiers sont intégrés dans l'analyse.

Les incertitudes, les hypothèses et les risques financiers et économiques peuvent être abordés en utilisant des méthodologies d'analyse de sensibilité (scénarios multiplies ou mise en œuvre de la méthode de Monte-Carlo).

Les projets de REUT sont actuellement souvent sous-évalués par rapport à d'autres projets liés à l'eau, notamment car les avantages sociaux, environnementaux et sanitaires tels que la protection des bassins versants, le développement économique local, et l'amélioration de la santé publique ne sont pas correctement quantifiés (World Bank, 2010).

Les analyses coût-bénéfice sont rarement effectuées de manière complète. Cela a sans doute mené à l'abandon de projets qui auraient été économiquement valables. Les coûts et les bénéfices indirects, mais aussi les externalités sociales et environnementales doivent être intégrées dans les analyses. En Égypte, aucune ACB intégrant tous les coûts et les bénéfices indirects n'a été effectuée.

Dans de nombreux pays en développement, l'ACB ne tenterait plus de déterminer si la REU est rentable ou non, mais de définir et d'aider à sélectionner les scénarii les plus rentables et les plus durables. Les analyses coûts bénéfices ont néanmoins été menées en France (ONEMA - Loubier 2013) et en Italie (Verlicchi 2012) sur plusieurs projets de REUT, tout en soulignant la nécessité de nouveaux développements méthodologiques et de davantage de retours d'expériences.

Dans certaines régions (Méditerranée), en particulier dans les zones rurales pauvres et en croissance rapide, les bénéfices liés à la REUT (préservation des ressources, soutien à l'agriculture irriguée, etc.) peuvent être suffisamment importants pour rendre l'ACB purement secondaire lors de la prise de décision sur la mise en œuvre de systèmes de traitement des eaux usées (Choukr'Allah 2010).

Certaines limites et critiques de la méthodologie ABC ont trait à l'utilisation d'indicateurs environnementaux et sociaux qui ne reflètent pas le véritable impact sur l'environnement ou sur la société. Les méthodologies utilisées (méthodes d'évaluation contingente, méthode d'expérimentation des choix, etc.) peuvent prendre du temps et être difficiles à mettre en œuvre.

LES OUTILS D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

Les outils d'évaluation environnementale ont été développés et utilisés avec les objectifs principaux suivants :

- assurer la durabilité environnementale ;
- détourner les impacts dangereux qui pourraient avoir une incidence sur les consommateurs ;
- réduire les dommages sur l'environnement.

L'empreinte eau est un outil d'analyse mono-critère. Il se concentre sur les impacts sur les ressources en eau en mesurant la quantité d'eau utilisée pour produire un service. Le concept d'eau virtuelle y est inclus. L'empreinte eau permet également de quantifier l'eau consommée par un pays donné, ou, globalement, dans un bassin fluvial particulier ou dans un aquifère.

L'étude d'impact environnemental et l'évaluation et la gestion des risques sont parmi les outils environnementaux employés dès les étapes projets préliminaires dans les secteurs du traitement et de la réutilisation des eaux usées (Ahmed 2010).

La méthodologie **Analyse du Cycle de Vie** a été adaptée au traitement des eaux usées, mais aussi pour les systèmes d'irrigation, néanmoins, il semble qu'elle n'ait à ce jour jamais (ou rarement) été appliquée sur une filière complète et intégrée de réutilisation des eaux usées.

Les Etudes d'Impact Environnemental (EIE)

L'EIE est un cheminement pour "identifier les conséquences probables sur l'environnement biogéophysique et sur la santé et le bien-être humain de la mise en œuvre d'activités particulières, et communiquer ces informations, à un stade où elles peuvent affecter matériellement les décisions de ceux en charge d'étudier les propositions" (Wathern 1988). L'objectif de l'EIE est de faire en sorte que les problèmes environnementaux soient prévus et bien traités par les décideurs.

L'évaluation des impacts environnementaux a été mise en place sous de nombreuses formes à travers le monde et selon des méthodes non équivalentes. L'EIE a été largement utilisée pour la mise en place de stations d'épuration comme un outil de planification pour prévoir les impacts attendus, fournissant ainsi des alternatives possibles et des mesures d'atténuation (Ahmed 2010). Dans les pays en développement les organismes d'aides demandent souvent des EIE pour les projets de stations d'épuration et de réutilisation qu'ils financent.

Cette méthodologie a néanmoins certaines limites qui ont tendance à limiter son statut d'outil d'évaluation environnementale. Elle est conduite en un temps donné, souvent tardivement dans le processus de planification, généralement après que les gestionnaires du projet aient fixé une conception particulière. Il est alors difficile d'attendre de l'EIE qu'elle propose des changements importants dans les décisions fondamentales.

L'évaluation et la gestion des risques

La réutilisation des eaux usées induit une combinaison de risques sanitaires, environnementaux ou agronomiques. L'évaluation et la gestion des risques est un processus complet dans lequel les données disponibles sont utilisées pour estimer la fréquence d'apparition des dangers ou des événements spécifiques (probabilité), ainsi que l'ampleur de leurs impacts (Condom 2012).

Les risques et leurs impacts doivent être clairement identifiés, puis des mesures de réduction des risques sont proposées. Cette méthode est considérée comme un outil d'aide à la décision utilisé par les gestionnaires et les décideurs pour développer, analyser et comparer différentes options et sélectionner la réponse appropriée à un danger potentiel pour la santé. Un niveau de risque « acceptable » doit être identifié (Ahmed 2010). Néanmoins une limite de l'analyse des risques est que si un produit est converti en une autre substance en cours d'utilisation, il ne figure pas dans le processus d'évaluation.

Par rapport à l'EIE classique, l'évaluation et la gestion des risques comprend et considère les incertitudes et les risques lors de la mise en œuvre et du fonctionnement du projet. L'évaluation et la gestion des risques est maintenant et de manière quasi systématique inclue dans l'EIE.

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

La méthodologie ACV

L'analyse de cycle de vie facilite la prise de décision et fournit une évaluation rigoureuse de la durabilité environnementale d'un produit, d'un service ou d'un procédé. Elle est actuellement considérée comme l'outil d'évaluation environnementale le plus holistique. Elle tient compte de tous les impacts amont et aval liés à un processus. Toutes les problématiques environnementales sont ainsi rassemblées dans une méthodologie quantitative (Risch 2012). La méthodologie de l'ACV va également au-delà car elle fournit une base pour évaluer le potentiel d'amélioration de la performance environnementale d'un système (Hellweg 2014).

BOÎTE À OUTILS MÉTHODOLOGIQUE – ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Les normes ISO 14040 et ISO 14044 traitent à la fois les détails techniques et l'organisation conceptuelle de l'ACV.

L'organisation internationale de normalisation (ISO) a défini l'ACV comme «une technique pour évaluer les aspects environnementaux et les impacts potentiels associés à un produit en :
- dressant un inventaire des entrées et sorties pertinentes d'un système de production ;
- évaluant les impacts environnementaux potentiels associés à ces entrées et ces sorties ;
- interprétant les résultats de l'analyse de l'inventaire et des phases d'évaluation des impacts par rapport aux objectifs de l'étude "(ISO 14.040).

L'ACV est globale, multicritères et quantitative. Elle suit un processus itératif entre les résultats et l'interprétation.

ÉTAPE 1 : Définition des objectifs de l'ACV : pourquoi l'ACV doit-elle être menée ?

ÉTAPE 2 : Description des limites du système (conceptuelles, géographiques et temporelles) : les limites doivent être définies en fonction des objectifs principaux de l'ACV et en intégrant le milieu récepteur. Elles auront une influence sur le processus de collecte des données. Les limites de l'ACV doivent être évaluées et anticipées en parallèle (qualité des données et hypothèses principales). Le diagramme de flux qui intègre toutes les étapes et toutes les composantes du processus est construit.

ÉTAPE 3 : Définition d'une unité fonctionnelle adaptée, une référence à laquelle les entrées et les sorties sont liées : c'est un produit ou un service auquel les impacts environnementaux seront évalués ou comparés. Cette définition est nécessaire pour assurer la comparabilité des résultats. Elle doit être liée aux principales questions / objectifs de l'étude.

ÉTAPE 4 : Inventaire : collecte de données afin de quantifier les entrées et sorties du système (énergie, matières premières, émissions et productions sont calculées sur l'ensemble du cycle de vie). Les données collectées sont également reliées à l'unité du processus et à l'unité fonctionnelle.

ÉTAPE 5 : Évaluation des impacts du cycle de vie : identification des effets et des impacts du système sur l'environnement. La qualité des données recueillies à l'étape 4 est capitale.

ÉTAPE 6 : Quantification des impacts et regroupement en catégories d'impacts et en effets intermédiaires (« mid-points », au milieu de la chaîne de causalité) : des facteurs d'équivalence peuvent être utilisés pour quantifier les différents impacts (par exemple en équivalent phosphate pour l'impact de l'eutrophisation, en équivalent CO_2 pour

le changement climatique, etc.). Les impacts sont ensuite regroupés en 18 catégories d'impacts indépendantes (le graphique du profil environnemental permet de comparer des scénarios sur la base de ces 18 catégories d'impacts, parmi celles-ci : changement climatique, eutrophisation, éco-toxicité, toxicité humaine, toxicité aquatique pour l'eau douce et pour l'eau de mer), puis en catégories d'impacts intermédiaires. Ils sont ensuite agrégés en 3 points finaux (les dommages, en fin de la chaîne de causalité) : la santé humaine (EVCI), les ressources (en valeur monétaire), et la biodiversité (en pourcentage des espèces touchées).
Les décideurs et les non initiés à cette méthodologie peuvent se trouver en difficulté lorsqu'il s'agit d'en tirer des résultats solides à partir des profils environnementaux.

ÉTAPE 7 : La normalisation est utilisée pour produire un cadre de référence. Les unités dans chaque catégorie d'impacts du profil environnemental sont différentes en raison des processus de calcul. Les valeurs sont donc reliées à l'ampleur du problème dans une période de temps donnée. Par exemple, le total des émissions en équivalent CO_2 du processus est relié à la quantité émise dans le pays durant la même période de temps.

ÉTAPE 8 : Une analyse de sensibilité des résultats est effectuée pour tester la robustesse des résultats en ce qui concerne les incertitudes et hypothèses principales (Wei 2015). En parallèle de l'analyse de sensibilité, l'incertitude peut être évaluée à l'aide de simulations de Monte-Carlo sur des ensembles stochastiques de données issues d'inventaire.

ÉTAPE 9 : l'étape d'attribution de valeurs vise à produire des scores individuels par pondération et par agrégation de tous les scores par catégories d'impacts. Cette étape simplifie la décision, mais est très controversée et subjective car elle est anthropocentrique et basée sur des jugements de valeur. Cette étape n'est pas obligatoire.

ÉTAPE 10 : Interprétation et présentation des résultats : présentation des origines critiques des impacts (questions clés pour la prise de décision) et des options pour réduire ces impacts.

L'ACV sociale vise à quantifier les conséquences sociales d'un produit ou d'un service de production, tout au long de son cycle de vie. Cette évaluation socio-économique peut également être utilisée pour structurer un dialogue avec les différentes parties prenantes. L'outil ACV est actuellement à un stade précoce de développement. Des données et des retours d'expériences sont donc nécessaires pour l'amélioration de la méthodologie.

L'ACV **simplifiée** est utilisée comme une alternative à l'ACV détaillée **lorsque le spectre complet des données nécessaires n'est pas disponible**. Elle utilise des ensembles génériques quantitatifs et / ou qualitatifs de données. Elle comprend également une estimation des impacts sur un cycle de vie simplifié qui se contente des étapes particulières du cycle de vie où les impacts environnementaux importants sont identifiés. Elle est généralement présentée comme une matrice : les étapes du cycle de vie sur un axe et les impacts environnementaux sur l'autre. Elle nécessite des coûts moindres et des délais plus courts. Cette méthodologie manque néanmoins encore de développement et a besoin de normalisation.

Plus récemment, un manque de méthodes holistiques a été identifié (Loiseau 2012) pour l'évaluation environnementale de scénarios territoriaux-régionaux (y compris toutes les activités de production et de consommation). Sur cette base, des ACV territoriales ont été développées (Loiseau 2013) comme outil très prometteur pour promouvoir le développement de l'économie circulaire.

L'ACV appliquée à la gestion de l'eau et le traitement des eaux usées

Dans un contexte de prise de conscience du changement climatique et de la rareté de l'eau, la gestion de l'eau dans les villes fait face à de nombreux défis, liés aux ressources en eau, aux utilisateurs de l'eau et aux technologies associées. Les décideurs ont besoin d'outils pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes urbains d'eau et ainsi comparer les solutions techniques, comprenant les infrastructures, l'exploitation et la maintenance. Les approches holistiques sont nécessaires pour évaluer tous les composants du système de manière intégrée, et l'analyse du cycle de vie est de plus en plus utilisée à cet effet au sein de la communauté de l'eau (Loubet 2014).

En ce qui concerne plus particulièrement les systèmes de traitement des eaux usées, l'objectif de l'ACV est d'évaluer si les technologies de traitement de haute technicité utilisées pour purifier l'eau (et réduire ainsi l'impact sur la ressource en eau en sortie) sont valables vis-à-vis des impacts liés à l'énergie, aux matières premières, à la consommation des produits chimiques et aux émissions. Le cycle complet du processus de traitement y est analysé. Les études ACV doivent donc être utilisées pour guider la prise de décision afin d'éviter la mise en place d'infrastructures ne répondant pas aux objectifs humains et environnementaux au profit de technologies propres incluant un recyclage des nutriments et de l'eau et une réutilisation efficace des ressources (Risch 2015).

Certaines études récentes ont ouvert de nouvelles perspectives pour mieux tenir compte des avantages potentiels de la réutilisation : (i) (Risch 2014) en évaluant la part très importante de la consommation d'eau au cours du traitement des eaux usées et (ii) (Harder, 2014) et (Heimersson 2014) en incluant le risque pathogène dans l'analyse du cycle de vie de la gestion des eaux usées et, enfin, (iii) (Loubet 2013) en évaluant la perte d'eau à l'échelle du bassin versant dans une ACV qui intègre les effets cascades en aval.

L'ACV pour la réutilisation des eaux usées dans les pays en développement

Les projets de traitement des eaux usées sont rarement soumis à une ACV et aucune information n'a été trouvée dans la littérature au sujet d'ACV en cours sur des projets de réutilisation des eaux usées dans les pays en développement. La méthodologie ACV est néanmoins souvent connue du fait que de nombreux produits exportés vers les pays développés exigent une ACV pour pouvoir être vendus (garantie-produit du respect de l'environnement).

Dans le cas d'une évaluation de la filière de réutilisation d'eaux usées :

- « Du berceau à la tombe » : « berceau » équivaut à la production et à la collecte des eaux usées brutes, tandis que la « tombe » serait l'ensemble de tous les flux dans l'environnement (masses d'eaux réceptrices) ;

- Le service considéré pourrait être « irriguer 1 ha avec des eaux usées traitées », ou « cultiver 1 ha de cultures irriguées avec des eaux usées traitées », en comparaison avec l'utilisation de ressources en eau classiques;
- les sous-produits (ou co-produits) sont les boues produites au cours des étapes de traitement et les productions agricoles.

Le diagramme de flux représenterait les étapes diverses et successives de la filière de réutilisation des eaux usées traitées. Pour chaque étape (étapes de traitement, stockage, irrigation…) les entrées (matières premières, énergie, etc.) et les sorties (émissions dans l'air, dans l'eau, dans le sol et déchets solides) seraient calculées et converties en impacts pour l'environnement, avant d'être additionnées pour obtenir l'impact global du cycle de vie du produit (ou service) sur l'environnement et sur la santé.

Avant de mettre en route la méthodologie ACV, les objectifs de l'étude doivent être correctement identifiés :

- L'objectif peut être de comparer deux scénarii (2 scénarii de 2 technologies alternatives pour la réutilisation ou 1 scénario de réutilisation comparé à un traitement classique associé à une irrigation classique sans réutilisation). Il est alors possible de supprimer les étapes identiques («ceteris paribus»). Par exemple, des stations d'épuration sont déjà construites dans une ville (ou le seront dans tous les cas) et les décideurs cherchent à savoir si cela vaut la peine (d'un point de vue environnemental) de réutiliser de l'eau (en ajoutant des traitements tertiaires, en construisant des réseaux d'irrigation…), ainsi les étapes de traitement primaire et secondaire peuvent être soustraites (dans les deux scénarios) ;
- L'objectif peut être d'évaluer l'impact environnemental de l'irrigation avec des eaux usées traitées à des fins d'éco-conception (amélioration de l'éco-efficacité du système basée sur l'identification des principaux contributeurs aux impacts, à chaque étape du cycle de vie). Dans ce cas, toutes les étapes de la filière de réutilisation (depuis la collecte des EUB) doivent être incluses et analysées dans le diagramme de flux.

Les principales difficultés d'application de l'ACV dans les pays en développement sont les suivantes :

- Le faible niveau de conscience de l'utilité de tels outils parmi les décideurs ;
- Le manque de capacités (logiciel, méthodologie complexe non-adaptée) ;
- Le manque de données contextuelles accessibles ;
- La nécessité d'avoir des catégories d'impacts adéquates et adaptées ;
- Le manque de collaboration entre les experts de l'ACV dans la région.

La recherche sur l'ACV pour les eaux usées s'étend principalement dans les pays développés avec des contributions très limitées des pays en développement. Les bases de données sont donc limitées. Mais les données peuvent aussi être collectées à partir de la littérature, d'estimations, ou de modélisations mathématiques.

Une autre limite de l'ACV est la difficulté d'assimiler, d'intégrer et d'accéder à des résultats pour les décideurs, car elle ne fournit pas une note unique pour l'évaluation environnementale et pour la santé.

L'ACV simplifiée capte la complexité et l'ambiguïté de l'ACV et offre un cadre logistique approprié pour son application.

Dans les pays en développement confrontés à un besoin croissant d'installations de stations d'épuration et de systèmes de réutilisation, l'utilisation de l'ACV peut constituer un outil viable pour une prise de décision durable. La méthodologie ACV devrait être examinée et adaptée à l'élaboration des politiques environnementales.

L'UTILISATION COMBINÉE DE DIFFÉRENTS OUTILS POUR UNE ÉVALUATION SUR MESURE

Les approches multicritères et multidisciplinaires présentées plus haut traitent toutes les questions environnementales, mais les méthodologies sont adaptées pour atteindre des objectifs différents, du projet local aux réflexions stratégiques de plus grande envergure (ville, région, bassin versant). Les gestionnaires de projet doivent être conscients des spécificités des différents outils et définir soigneusement leurs objectifs avant de lancer des études.

Économie

L'ACV et l'EIE traitent toutes les deux des questions environnementales, mais le volet économique est difficilement pris en compte, laissant un vide d'informations incontournables (Ahmed 2010). **L'analyse coût /bénéfice économique et financière semblent être la mieux adaptée pour l'évaluation des considérations économiques**. Néanmoins, même si des ACB sont menées depuis le milieu du XXe siècle, de grandes difficultés et limites sont encore liées à l'utilisation d'indicateurs environnementaux.

Impacts environnementaux

L'étude d'impact environnemental et l'évaluation et la gestion des risques sont des approches localisées et site spécifiques puisque les émissions et les impacts réels sur l'environnement local spécifique du site sont évalués, tandis que l'ACV porte sur l'évaluation des impacts potentiels plus larges. L'ACV est une méthodologie limitée pour évaluer l'impact réel : par exemple les émissions et les impacts connexes sont quantifiés sur une période donnée sans tenir compte de la distribution au cours de cette période ni ses impacts spécifiques connexes (Ahmed 2010). En revanche, par rapport à l'ACV, l'EIE a tendance à négliger les impacts indirects et cumulatifs (Guinee 2001).

L'ACV est reliée à l'équilibre de masse et d'énergie pendant le fonctionnement normal, la chaîne d'effets étant limitée aux effets primaires ou aux effets potentiels, alors que les émissions accidentelles ou les accidents, qui sont considérés comme le nerf de l'évaluation et la gestion des risques, ne sont pas dans le viseur de l'ACV (Ahmed 2010).

Les résultats de l'évaluation des impacts par l'ACV sont exprimés sous la forme d'indicateurs numériques communs (pour tous les impacts / émissions) généralement non reliés à l'espace ni au temps, tandis que les impacts des études d'impact environnemental et des études d'évaluation et de gestion de risques sont exprimés en concentrations spécifiques pour un contexte et un projet donné.

Les spécificités des projets de réutilisation des eaux usées

Aucune solution unique d'outil n'existe, mais un ensemble d'outils complémentaires choisis et combinés en fonction du contexte et des objectifs peuvent permettre l'évaluation des projets en ce qui concerne des considérations économiques, environnementales et sociales.

Dans un premier temps les décideurs ont besoin d'identifier les scénarii de réutilisation des eaux usées qu'ils ont sur leur territoire.

Dans le cas où un projet est presque lancé (le traitement de la station d'épuration est choisi, il n'y a qu'un scénario de réutilisation), l'EIE et l'évaluation et la gestion des risques semblent être les outils les plus adaptés pour l'évaluation environnementale et l'évaluation des risques. De plus la réutilisation des eaux usées traitées peut avoir de vastes répercussions socio-économiques, et (comme indiqué dans le Chapitre 3) sur l'environnement au sens large. Des approches intégratives et des approches processus sont donc nécessaires.

Mais lorsque les décideurs ont besoin de raisonner à une échelle plus grande (région, bassin ou niveau de la ville) et sont impliqués dans les décisions plus larges et pour des grandes orientations, alors l'AVC est l'outil intégré qui pourrait permettre d'évaluer l'impact environnemental de différents scénarii de réutilisation.

Sur les projets de réutilisation des eaux usées actuels, l'EIE est souvent obligatoire (requise par les bailleurs de fond), tandis que l'ACV serait souvent effectuée sur des bases volontaires.

Les retours d'expériences de l'ACB et de l'ACV dans les pays en développement sont rares, en particulier sur la réutilisation des eaux usées. Si d'autres études sont effectuées, davantage de données et connaissances seront partagés.

PERSPECTIVES POUR DES DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Le volet économique d'un projet est une préoccupation majeure pour les décideurs et les bailleurs de fonds. Des outils spécifiques et accessibles - et leurs bases de données associées - doivent être développés afin de permettre aux départements techniques locaux d'ingénierie de mener des ACB privées et sociales.

Des méthodologies ACV ont déjà été développées pour traiter de projets de traitement des eaux usées et d'irrigation. L'ACV doit être appliquée à des projets de réutilisation des eaux usées pour en démontrer le fort potentiel sur des grands projets d'envergure. Commencer à collecter les données nécessaires aux ACV et développer un cadre méthodologique constituent les premières étapes.
Identifier les meilleurs indicateurs et les critères qui peuvent être utilisés pour surveiller la performance des processus dans les scénarii de réutilisation et développer des techniques de surveillance en temps réel (ou proche) pour leur mesure sont également l'une des clés de la durabilité des projets de réutilisation.

PRINCIPALES RECOMMANDATIONS POUR DES DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Cette section résume les principales recommandations pour combler les vides de connaissances, de méthodologies et de pratiques opérationnelles.

Adopter un cadre intégré

Il est fortement recommandé d'inclure la réutilisation des eaux usées dans tous les plans de gestion des ressources en eau intégrée et de la connecter avec d'autres secteurs économiques pour accélérer le recouvrement des coûts, la réduction des risques et une mise en œuvre durable.

Une réglementation spécifique et un cadre organisationnel doivent être mis au point pour permettre un **partage approprié des responsabilités** entre les différents, et souvent nombreux, partenaires des projets. Les lignes directrices et les politiques doivent promouvoir des **normes fondées sur les capacités et les options de réutilisation locales**.

Toutes les parties prenantes doivent être intégrées dès le début dans les plans de réutilisation de l'eau. Des platesformes multi-acteurs pour faciliter le dialogue et le développement de méthodes participatives sont autant d'outils facilitant l'absorption de l'innovation et l'apprentissage social.

Des solutions mixtes public / privé et public / public pour l'investissement, la prestation de services, l'exploitation et la maintenance peuvent être des options à prendre en considération.

Mettre à niveau des systèmes plus sûrs et contrôlés par le choix des technologies appropriées

Les risques sanitaires sont trop élevés dans les cas de réutilisation non contrôlée et non pilotée d'eaux usées brutes. Les avantages qu'elle procure en termes économiques et agronomiques ne permettent pas de les contrebalancer (bonnes pratiques et système multi-barrières mis en avant par l'OMS en 2006).

L'intérêt est croissant pour les systèmes de traitement à faible coût et à faible entretien tels que le lagunage, les zones humides, ou l'infiltration sol-aquifère. Plus de retours d'expériences (nouveaux pilotes) sur de tels systèmes sont néanmoins nécessaires. Les solutions avec le meilleur **rapport coût-efficacité** doivent en effet être prises en considération. La réduction des niveaux de risques (agents pathogènes et autres polluants) liés aux systèmes agronomiques (sols et cultures), mais aussi pendant le transport et le stockage des eaux, et au travers des systèmes d'irrigation, doivent être mieux compris et caractérisés. La recherche sur les technologies de traitement (même celles à faibles coûts et les technologies décentralisées) devrait donc se concentrer **sur des systèmes capables de réduire les agents pathogènes tout en maintenant le potentiel agronomique des eaux usées**.

Le choix des technologies de traitement doit être basé sur les qualités d'eau requises par les usages aval, la réutilisation des EUT doit donc être intégrée dès les phases de réflexion des systèmes de traitement.

Les systèmes de réutilisation des eaux usées dans les zones périurbaines sont souvent des systèmes urbains centralisés déployés sur de vastes superficies. Néanmoins les progrès dans des technologies et des systèmes de traitement des eaux usées décentralisées peuvent être particulièrement pertinents dans des contextes urbains en croissance rapide où l'installation d'infrastructures de collecte et de traitement centralisées n'est pas rentable (CGIAR 2012).

Préparer une nouvelle génération de décideurs et de professionnels

La formation et la sensibilisation des décideurs sont requises :

- à l'échelle nationale et régionale pour les décideurs, afin de leur donner les clés pour identifier les zones à fort potentiel et créer un cadre organisationnel adapté (réglementation, partage des responsabilités, etc.) ;
- à l'échelle locale et à l'échelle des projets pour les acteurs locaux en charge d'un projet de réutilisation, afin de leur fournir un cadre certifié pour mener à bien leur projet depuis le stade initial (l'idée) jusqu'à un système durable.

A titre d'illustration, sélectionner les technologies les plus adaptées est souvent difficile pour les décideurs et les gestionnaires de projet. Ils doivent être conscients de toutes les possibilités et avoir tous les éléments techniques clés pour faire le meilleur choix en fonction de leurs conditions et contraintes locales (économiques, climatiques, techniques, etc.).

Évaluer les impacts sur les ressources et développer des outils d'aide à la décision

Il serait intéressant d'appliquer des **méthodologies ACV** sur des sites spécifiques pour obtenir une meilleure vue d'ensemble de toutes les interactions et de tous les impacts entre l'énergie, les masses d'eau et la réutilisation des eaux usées.

La salinité est une question clé souvent sous-évaluée dans les projets et les règlements. Une gestion appropriée de la salinité de l'eau et du sol doivent pourtant être mise en œuvre pour atténuer les effets.

La composante économique du projet est une préoccupation majeure pour les décideurs et les bailleurs de fonds. Des outils spécifiques et accessibles - et les bases de données associées - doivent être développés afin de permettre aux départements techniques d'ingénierie locaux de mener des **ACB privées et sociales** qui tiennent compte de l'équité sociale lors de la définition des mécanismes de recouvrement des coûts.

SYNTHÈSES PAYS

PAYS 1 : TUNISIE
PAYS 2 : MAROC
PAYS 3 : JORDANIE
PAYS 4 : EGYPTE
PAYS 5 : LES TERRITOIRES PALESTINIENS

PAYS 1 : TUNISIE

Contexte
La Tunisie développe la réutilisation d'EUT depuis plus de 30 ans. Le secteur du traitement des eaux a connu des développements en continu qui ont permis la mise en place d'installations planifiées. Environ 24 % des eaux usées traitées sont utilisée à des fins d'irrigation de l'agriculture. Plus qu'ailleurs dans le monde la Tunisie a également pris des mesures pour atténuer les risques environnementaux et sanitaires liés à l'utilisation d'EUB.

Expériences remarquables
La Tunisie a mis en œuvre avec succès la réutilisation des eaux usées traitées dans plusieurs secteurs :
- L'arrosage de tous les golfs tunisiens avec des EUT ;
- L'irrigation de plus de 3 000 ha de cultures et de forêts (chiffre 2009) ;
- La réutilisation à des fins environnementales telles que réhabilitation de zones humides et recharge des nappes, mis en œuvre à la fois sur des pilotes et dans des projets à grande échelle.

Principaux freins
Des évolutions sur la règlementation sont attendues. L'irrigation avec des EUT est actuellement interdite pour les cultures à forte valeur ajoutée telles que les cultures maraichères, incitant les agriculteurs à revenir vers des ressources en eau conventionnelles, plus couteuses.

Les STEP n'étaient initialement pas construites à proximité des zones irriguées, diminuant l'attractivité de la REUT. Les chefs de projet essaient à présent d'intégrer les besoins des utilisateurs finaux lors de l'installations des équipements de traitement (Kampa 2010).

Perspectives futures
Des travaux ont déjà été réalisés et sont encore en cours pour caractériser et maitriser les impacts sanitaires, agronomiques et environnementaux (impacts à moyen et court terme sur les plantes, les sols et les eaux souterraines par différents polluants, salinité, métaux lourds et agents pathogènes). Les travaux de recherche se concentrent maintenant sur les leviers pour diffuser cette pratique (la préférence va encore à l'eau douce, du fait que des cultures à plus haute valeur ajoutée peuvent être cultivées).

En plus des révisions de la réglementation, la poursuite de travaux de nature économique sur la valorisation et la tarification est nécessaire (comparaison EUT / ressource eau douce conventionnelle).

Les expériences montrent que des efforts supplémentaires doivent également être réalisés en matière d'éducation et de participation des communautés locales et des usagers finaux des eaux usées.

FOCUS : Gestion de la salinité des EUT à Sfax
Dans la ville de Sfax en Tunisie l'usine de traitement des eaux usées reçoit des effluents domestiques et industriels. Le climat est aride avec des précipitations annuelles de 200 mm. Deux types de sols avec des propriétés différentes, un calcisol sableux et un fluvisol argileux, ont été irrigués respectivement pendant 15 et 4 ans avec des eaux usées traitées. La conductivité électrique de l'effluent (CE) variait selon l'année entre 4 et 7,7 dS/m (MDT entre 3,56 et 5,13 g/L). L'irrigation a augmenté de façon significative la salinisation et la sodification des deux types de sols étudiés. Le calcisol irrigué n'est pas sodique et est modérément salinisé même s'il a été irrigué pendant 15 ans, tandis que le calcisol témoin (non irrigué) n'est pas du tout salinisé. Le fluvisol irrigué est sodique et salinisé alors même que le fluvisol témoin (non irrigué) est salinisé mais non sodique. Il semble que l'irrigation ait eu des impacts différents selon les propriétés du sol (principalement de la texture du sol), selon le protocole d'irrigation, et selon la gestion des cultures. La CE des couches superficielles du sol diminue avec le lessivage du sel par des eaux usées traitées complémentaires et par les pluies d'automne-printemps et augmente dans les intervalles entre irrigation pendant la saison des récoltes, à cause des remontées d'eau salinisée par l'évaporation ou par absorption racinaire (Kallel 2012).

PAYS 2 : MAROC

Contexte

Le Maroc accuse un retard par rapport à la Tunisie dans le domaine de la REUT, mais est doucement en train de le combler avec la construction de nombreuses stations d'épuration dans des villes de taille moyenne, dont la plupart utilisent des systèmes de lagunage. Les nouveaux projets de construction de STEP intègrent désormais souvent la REUT dans leurs objectifs. L'objectif de cette orientation politique est de faire face à la prochaine crise de l'eau et de limiter la réutilisation incontrôlée des EUB dans les zones périurbaines.

Expériences remarquables

Dans de nombreuses grandes villes les EUT sont déjà réutilisées pour arroser des terrains de golf ou des espaces verts. La ville moyenne de Settat, avec 300 ha de maïs, de blé et d'oliviers irrigués par des EUT, est l'un des meilleurs exemples de REUT au Maroc.

La réutilisation des EUB reste une pratique courante. En 2009, il a été estimé que près de 70 Mm^3 d'EUB ont été utilisés pour irriguer une superficie d'au moins 7 200 ha, à la périphérie de certaines grandes villes (Marrakech, Meknès, Oujda, Fès…) en aval des points de rejet des effluents, ou autour des réseaux de traitement. L'irrigation des cultures maraîchères destinées à la vente avec des EUB est interdite au Maroc.

Principaux freins

Les pouvoirs publics ne parviennent pas contrôler la réutilisation des EUB et sont par ailleurs conscients des avantages économiques qu'elle procure. Les consommateurs en sont conscients mais ne sont pas prêts à accepter leur légalisation, même si des systèmes contrôlés sont mis en place. Le Maroc a récemment été confronté à des problèmes sanitaires graves liés à cette pratique.

La concurrence avec la libre et souvent gratuite utilisation d'eau conventionnelle, combinée à l'efficacité limitée des STEP, sont responsables de l'échec de plusieurs projets de REUT, en particulier dans les petites collectivités.

Le cadre juridique et réglementaire sur la gestion des eaux usées manque de cohérence et est incomplet. Il limite la coordination, la régulation des tarifs, l'exploitation et la surveillance des rejets, les sanctions pour non-respect des normes et obligations (y compris pour les rejets industriels) et la gestion appropriée des boues associées.

Perspectives futures

Un projet de nouvelle règlementation est en cours d'élaboration par le groupe interministériel (Reval). La REUT émerge lentement au Maroc comme un levier majeur pour lutter contre la pénurie d'eau. En dépit des contraintes organisationnelles et financières, le gouvernement tente d'encourager et de promouvoir des projets de REUT centralisés et décentralisés (systèmes à petite échelle dans les zones rurales).

PAYS 3 : JORDANIE

Contexte

En Jordanie, pays à fort déficit hydrique, la REUT est depuis longtemps une composante parfaitement intégrée de la gestion à long terme des ressources en eau. La REUT propose une alternative à la désalinisation d'eau et aux transferts d'eau très coûteux.

Expériences remarquables

La Jordanie réutilise jusqu'à 85% des EUT. Toutes les eaux usées traitées collectées des deux villes principales (Amman et Zarqa) sont mélangées avec l'eau douce (le Réservoir King Talal) puis utilisées pour l'irrigation non restrictive dans la vallée du Jourdain.

Irrigation REUT proche d'Amman en Jordanie – Ecofilae © Condom

Principaux freins

La surexploitation des stations d'épuration provoque la production d'EUT de faible qualité. Lorsqu'elles ne sont pas diluées, elles ne peuvent être légalement utilisées que pour une irrigation restrictive : néanmoin de nombreux prélèvements illégaux apparaissent sur le réseau entre la station d'épuration et les réservoirs où ils sont dilués.

Perspectives futures

Les lignes directrices doivent être transformées efficacement en normes, les programmes de surveillance mis en œuvre, et les valeurs seuils recommandées appliquées.

La réhabilitation des STEP est l'un des défis majeurs et les options de REUT doivent être examinées et inclues à chaque nouveau projet. Le devenir des co-produits de l'eau (comme les boues) doit être anticipé avant toute nouvelle construction. Aucune filière pour le devenir des boues n'avait été anticipée pour la STEP d'As-Samra (Amman). La réhabilitation des environnements salinisés doit également être considérée comme une utilisation potentielle des eaux usées traitées.

Les expériences en Jordanie révèlent que les interventions en termes de cadre juridique doivent être complétée par des campagnes de sensibilisation. La population doit également être intégrée dans le processus de REUT pour assurer l'acceptabilité et limiter l'utilisation non planifiée des eaux usées.

PAYS 4 : EGYPTE

Contexte

Le contexte est marqué par des ressources en eau limitées (Indicateur Falkenmark près de 650 m³/an/hab.) et de forts besoins en eau pour l'agriculture. Les ressources en eau conventionnelles (le Nil et les eaux souterraines) peuvent difficilement être davantage mobilisées.

Le Nil et son delta reçoivent tous les types de rejets d'eau : eaux domestiques traitées et non traitées, effluents industriels, qui provoquent de sévères pollutions de l'eau (Figure 21).

Les eaux de drainage agricole et les eaux usées, diluées dans l'eau « douce » du Nil, sont intensivement et depuis longtemps réutilisées en aval, à plusieurs fins, y compris l'irrigation des cultures.

Dans le delta du Nil la surface cultivée est de 200 000 ha, le volume d'eau potable produit est d'environ 1 mm³/an, le volume d'EUT de 0.241 mm³/an.

Expériences remarquables

La réutilisation des eaux usées est une ancienne pratique en Égypte. Depuis 1930, les eaux usées domestiques ont été réutilisées sur des sols sableux dans des zones telles qu'Al Gabal Al Asfar et Abou Rawash.

Depuis les années 1990, l'Égypte a décidé de recycler les EUT pour l'arrosage des forêts plantées (Figure 21). Des plantations pilotes de futaies ont été faites sur 10 gouvernorats couvrant toutes les zones climatiques agricoles. L'Égypte est l'un des premiers pays à avoir développé des partenariats public-privé sur la REUT pour ces projets. La REUT s'est donc faite sur des plantations de forêts dans le désert, mais jamais pour irriguer d'autres productions de type maraichage et cultures de plein champs.

Le long du Nil et, dans le delta, la réutilisation des eaux de drainage est maintenant planifiée et en partie contrôlée.
Mais les pratiques encore courantes de réutilisation non-planifiée et non-contrôlée par les agriculteurs apportent des risques considérables pour la santé, peu d'autres options s'offrent aux agriculteurs.

Les assolements sont adaptés en fonction de la qualité de l'eau : de l'amont à l'aval, le riz, le blé et le maïs laissent place à l'aquaculture.
Des systèmes de réutilisation à petite échelle pour les eaux grises ou bayaras (réservoirs sceptiques) sont également développés dans les zones rurales où l'extension de la couverture des réseaux de traitement de l'eau et des stations d'épuration n'est pas planifiée pour les prochaines décennies.

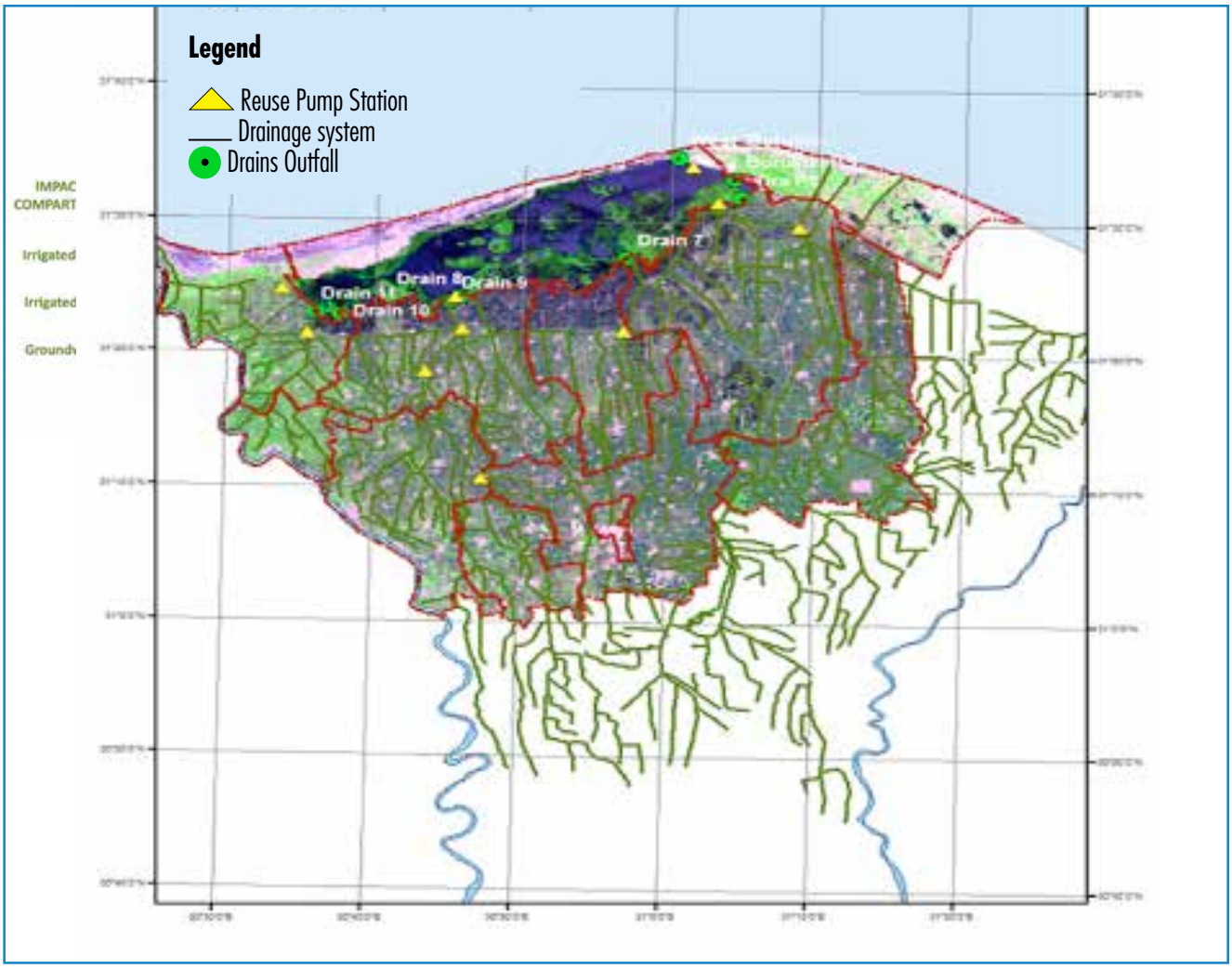


FIGURE 20 : Systèmes de drainage et de reuse dans le Delta du Nil – Farag ICID 2015

Principaux freins

La règlementation et les normes sont actuellement très restrictives : la réutilisation des eaux usées traitées est limitée à l'irrigation des plantations arboricoles. Les restrictions sur les usages, ainsi que du faible coût d'utilisation des eaux du Nil et des ressources souterraines n'encouragent pas les investissements dans la réutilisation des eaux usées. Le respect et l'application des normes sont néanmoins très faibles, car elles ne sont pas abordables pour le pays.

Plusieurs ministères et autorités sont impliqués dans des projets de réutilisation des eaux usées traitées et ils manquent de coordination et de communication.

Perspectives futures

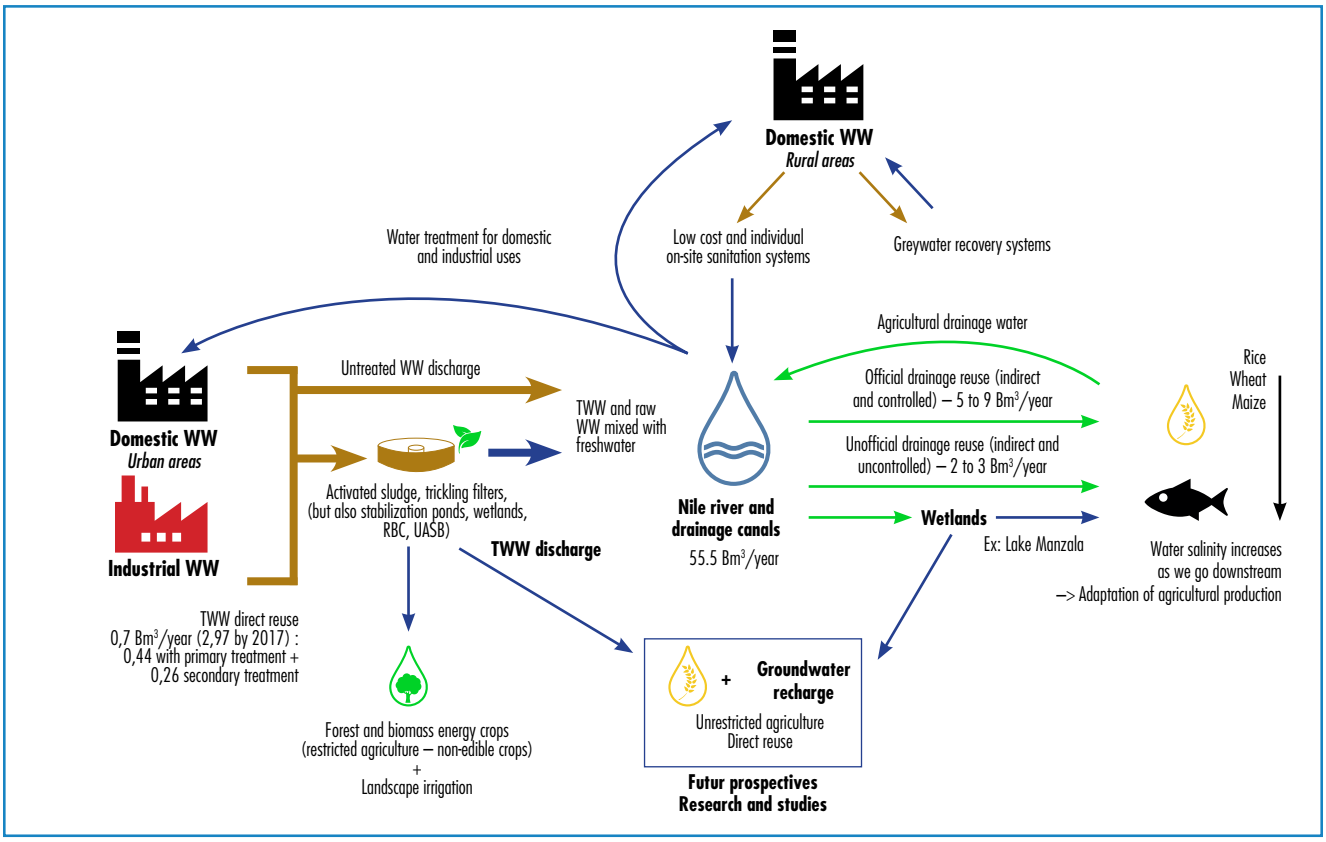
La prochaine révision de la règlementation devrait inclure l'irrigation des cultures vivrières et la recharge des eaux souterraines.

Aucun système de traitement centralisé n'est planifié dans les zones rurales. Des systèmes décentralisés à petite échelle et à bas coût associés à la REUT devraient être mis en place.

Des méthodes d'évaluation économique sont également requises car aucune analyse coût-bénéfice complète n'a jamais été effectuée sur de la REUT en Égypte : la valeur totale des EUT n'est pas encore pleinement exploitée.

Des travaux sont également nécessaires pour contrôler la qualité des eaux uses traitées et sensibiliser l'opinion publique dont les craintes sur les aspects sanitaires constituent un point de blocage pour poursuivre la propagation de la REUT.

FIGURE 21 : Schéma de synthèse des flux d'eaux usées et de réutilisation en Egypte - Schéma Ecofilae



PAYS 5 : LES TERRITOIRES PALESTINIENS

Contexte

Les Territoires Palestiniens (Bande de Gaza et Cisjordanie) sont confrontés à de fortes contraintes vis-à-vis des ressources en eau, tant sur leur qualité que sur leur rareté : il n'y a quasiment pas d'eau de surface, le wadi Gaza est dévié avant d'atteindre la bande de Gaza, l'aquifère côtier (Gaza) est surexploité, salé et pollué. Par ailleurs, la population croit et les stations d'épuration sont surchargées.

Néanmoins les eaux usées générées (56 mm^3/an à Gaza) correspondent potentiellement à 70% de la demande en eau d'irrigation à Gaza.

Expériences remarquables

Les expériences de réutilisation des eaux sont encore faibles en Palestine. Les villages d'Anza et de Beit Dajan en Cisjordanie produisent des cultures grâce à une utilisation sûre et durable d'eaux usées.

Au niveau de la station d'épuration de Sheikh Ajleen (Bande de Gaza), les eaux usées partiellement traitées sont réutilisées pour irriguer des plantations d'agrumes, d'oliviers et de palmiers. La rentabilité économique y est très élevée pour les agriculteurs (économies en apports de nutriments, meilleurs rendements).

Des ONGs aussi ont installé des systèmes de réutilisation à petite échelle.

Principaux freins

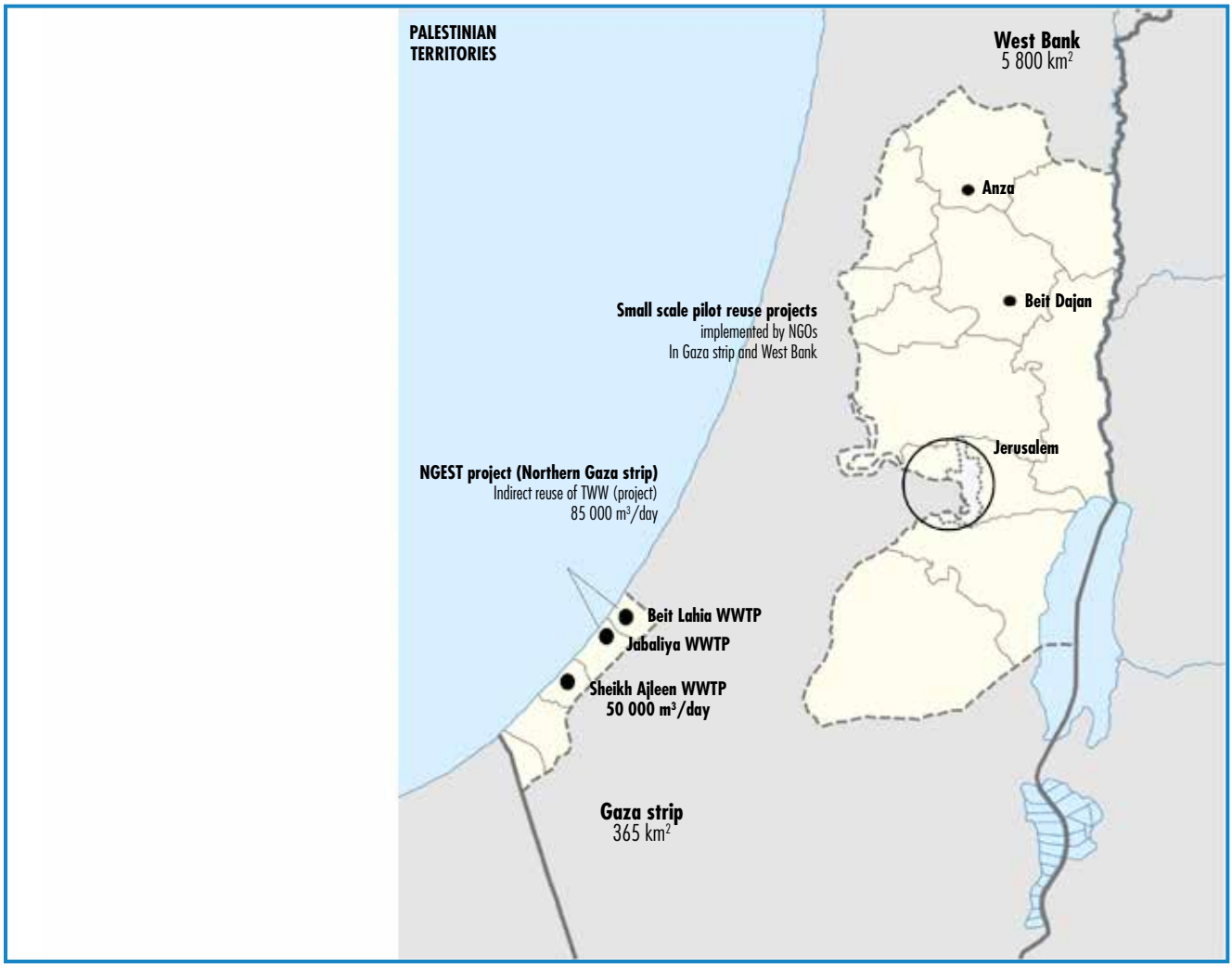
Le cadre réglementaire est très récent mais l'irrigation de cultures maraichères avec des eaux usées traitées est toujours interdite.

Au-delà du contexte politique complexe, la coordination et la communication entre les multiples organes de l'Autorité Palestinienne de l'Eau sont des facteurs limitants.

Perspectives futures

Le projet NGEST mis en œuvre dans la bande de Gaza (Projet 9) est considéré de loin comme le plus grand projet de REUT de Palestine.

FIGURE 22 : Projets de REUT dans les territoires palestiniens - Schéma Ecofilae



SYNTHÈSES PROJETS

PROJET 1 : Expérience de la ville d'Accra au Ghana (Drechsel 2014)
PROJET 2 : La filière de réutilisation à Faisalabad (Pakistan)
PROJET 3 : La filière de réutilisation dans le district de Thanh Tri à Hanoï (Viet Nam)
PROJET 4 : La filière de réutilisation à Settat (au Maroc)
PROJET 5 : La filière de réutilisation à Ouagadougou (Burkina Faso)
PROJET 6 : La filière de réutilisation à Okhla Delhi (India)
PROJET 7 : Expérience à Dakar et ailleurs au Sénégal
PROJET 8 : La filière de réutilisation à Korba (Tunisie)
PROJET 9 : La filière de réutilisation au Nord de la Bande de Gaza dans les Territoires Palestiniens– le projet NGEST (non mis en œuvre en 2014)
PROJET 10 : La filière de réutilisation à Harare (Zimbabwe)
PROJET 11 : Expérience de la ville de Bogota (Colombie) - USAID 2012
PROJET 12 : Expériences en Lybie

PROJET 1
Expérience de la ville d'Accra au Ghana (Drechsel 2014)

La difficulté de mettre en place et d'exploiter efficacement des infrastructures d'assainissement

Au Ghana, seule une part mineure des boues fécales et des eaux usées est vraiment traitée et moins de 5 % de la population est connectée à un système d'assainissement. Selon l'IWMI, en 2013, plus de 50 % des STEP étaient non fonctionnelles, et plus de 25 % l'étaient partiellement.

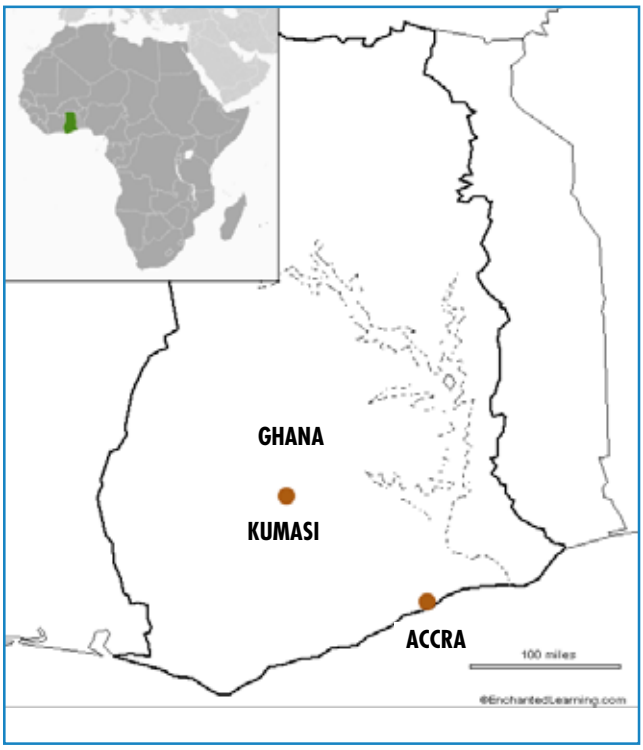


FIGURE 23 : Accra et Kumasi au Ghana

La valorisation des eaux usées brutes : une pratique courante

Au Ghana, la plupart des ressources en eau mobilisées pour l'irrigation sont contaminées par des eaux usées domestiques non traitées provenant d'un mauvais assainissement urbain. L'IWMI (non publié) a estimé qu'au Ghana une superficie de 40.000 ha est irriguée de façon saisonnière à partir d'EUB, autour des villes et des villages. Cela représente plusieurs fois l'équivalent de la superficie totale du pays actuellement sous irrigation formelle.

Pour la ville d'Accra (population estimée à environ 2,5 millions d'habitants), les principales origines de l'eau d'irrigation sont des collecteurs d'eaux pluviales et des cours d'eau pollués. La composition des eaux de ces drains naturels ou construits par l'homme varie entre des EUB, des eaux pluviales et des eaux, avec une dilution fonction des lieux et des saisons. Quelques agriculteurs utilisent également des eaux usées brutes à partir des conduites d'égout perforées ou des effluents partiellement traités, dans des lagunes de systèmes dysfonctionnels de traitement des eaux usées.

La rivière Odaw au Ghana, un désastre environnemental préoccupant qui rejoint le lagon de Korle avant de rejoindre l'océan – IWMI

Eau dérivée de drains pour l'irrigation agricole à Accra (Ghana) – Photographie : Mary Lydecker

Pratiques agricoles et pratiques d'irrigation

A Accra, y compris dans les districts d'Ashaiman et Tema, on dénombre environ 800 à 1 000 maraichers dont 60% produisent des légumes exotiques (laitues, choux, oignons de printemps, choux-fleurs…) et 40% produisent des légumes traditionnels et autochtones (tomates, gombos, corètes potagères, aubergines, et piments).

La taille des parcelles cultivées en ville avoisine en moyenne 0,01 à 0,02 ha par agriculteur, avec un maximum de 2 ha dans les zones péri-urbaines. L'arrosoir est la manière la plus courante d'amener manuellement l'eau à la parcelle depuis des ressources à proximité, mais des seaux ou de petites pompes motorisées peuvent également être utilisés. L'irrigation par gravité, à la raie, est pratiquée à Accra tandis que les systèmes d'irrigation au goutte à goutte et par aspersion sont peu fréquents.

Les risques sanitaires associés à la contamination par des pathogènes

Au Ghana, et plus largement dans la sous-région, le majeur problème de santé concerne les maladies de type féco-oral transmises par des agents pathogènes. L'espérance de vie corrigée de l'incapacité (EVCI1), autrement appelée charge de morbidité, ou Disability Adjusted Life Years (DALY) en anglais, est estimée à 0,017 par personne par an au Ghana en milieu urbain, en raison de diarrhées causées par des problèmes d'eau et d'assainissement (Seidu 2011) alors que l'OMS préconise une valeur inférieure à 10^{-6} DALY.

Problèmes sanitaires et environnementaux associés aux métaux lourds et aux rejets chimiques industriels

Au Ghana, et plus largement dans la sous-région, le flux d'effluents industriels dans les cours d'eau urbains et péri-urbains est relativement faible puisque les grandes industries se trouvent principalement le long de la côte. Des tanneries, des mines d'or ou des sites de réparation de véhicules ont néanmoins été relevés en tant que sources de pollution des EUB et des cours d'eau par les métaux lourds.

Les avantages agronomiques de la réutilisation des eaux usées brutes

Près de 70% des agriculteurs urbains ghanéens ont indiqué qu'ils avaient cultivé leurs parcelles de manière continue depuis plus de 10 à 20 ans. Ce résultat est remarquable dans un contexte tropical qui, normalement, fonctionne uniquement grâce à des rotations. Mais la contribution des EUB en termes d'apports de nutriments est néanmoins inférieure quand celles-ci sont diluées. Pour les apports en azote et en phosphore via les eaux usées, ils ont été estimés par Erni, et al. (2010) à environ 10% de ce qu'apportent les engrais, le long de la rivière Oda qui absorbe et dilue la plupart des eaux usées produites à Kumasi.

Les agriculteurs capables de puiser dans des EUB (à Accra, Tamale) et qui ont expérimenté leur valeur nutritive, essaient de la prendre en compte dans la gestion de la fertilité des sols. La plupart des agriculteurs, cependant, utilisent des eaux usées diluées ou de l'eau de cours d'eau pollués ayant des taux de nutriments trop faibles pour en tirer profit et l'intégrer dans leurs programmes de fertilisation des cultures. Les concentrations en nutriments varient avec la dilution, avec la distance à la source d'eaux usées, avec le temps et entre les saisons, il est donc presque impossible pour les agriculteurs (qui ne peuvent pas payer les laboratoires) de prédire les teneurs en éléments nutritifs.

Tout une économie locale et de subsistance dépend de cette ressource

Au Ghana l'agriculture urbaine et périurbaine est une activité rentable avec des taux de productions très hauts. Les agriculteurs sont néanmoins souvent contraints de se tourner vers d'autres lieux de production lorsque leurs parcelles sont prises pour la construction. L'agricuture péri-urbaine et urbaine profite à environ 2 000 agriculteurs urbains, 5 300 revendeurs dans la rue, et 800 000 consommateurs quotidiens dans les grandes villes, auxquels s'ajoute un nombre inconnu de commerçants. A Kumasi (autre ville du Ghana) la demande en légumes (laitues, cebettes..), comme en lait frais, est presque entièrement couverte par la production intra-urbaine. Les tomates, les aubergines, et le manioc, tout comme les œufs et les volailles sont produites dans la zone péri-urbaine alors que les produits de base tels que le taro, le plantain, le maïs et le riz proviennent de zones rurales ou sont importés.

PROJET 2
La filière de réutilisation à Faisalabad (Pakistan)

Contexte et Objectifs du projet
L'eau est une ressource rare dans la zone péri-urbaine de Faisalabad et les EUB sont réutilisées pour l'irrigation sur plus de 2 500 ha.

Acteurs, opérateurs et Bailleurs de fonds
La WASA (Water And Sanitation Agency) est en charge du projet de REUT.

Filière technique
Les EUT issues des lagunes de traitement de Faisalabad ne sont plus utilisées par les agriculteurs de la zone péri-urbaine. Les agriculteurs sont revenus à l'utilisation des EUB car elles offrent plus d'avantages agronomiques et économiques.
Les filières de réutilisation (REUT abandonnée et REUB actuelle) sont décrites dans la Figure 24 ci-dessous.

Freins rencontrés et solutions mises en œuvre
Des problèmes techniques liés au fonctionnement des lagunes sont en cause pour expliquer l'échec du projet de REUT.

Les bassins ne fonctionnent pas de manière efficace et les performances sont donc très limitées. Les conditions climatiques extrêmes n'ont pas correctement été prises en compte lors de la conception : les taux d'évaporation sont supérieurs à 10 mm/jour et les eaux usées traitées sont trop concentrées et salines pour une réutilisation directe par les agriculteurs.

De plus, l'utilisation directe des EUB par les agriculteurs aggrave le dysfonctionnement de la STEP : les quantités d'EUB en entrée sont trop faibles, entrainant un doublement du temps de rétention hydraulique dans les bassins.

Les bassins ont favorisé la prolifération de moustiques (vecteur de maladies) en raison de l'absence d'une grille qui a été ajoutée par la suite dans le traitement préliminaire.

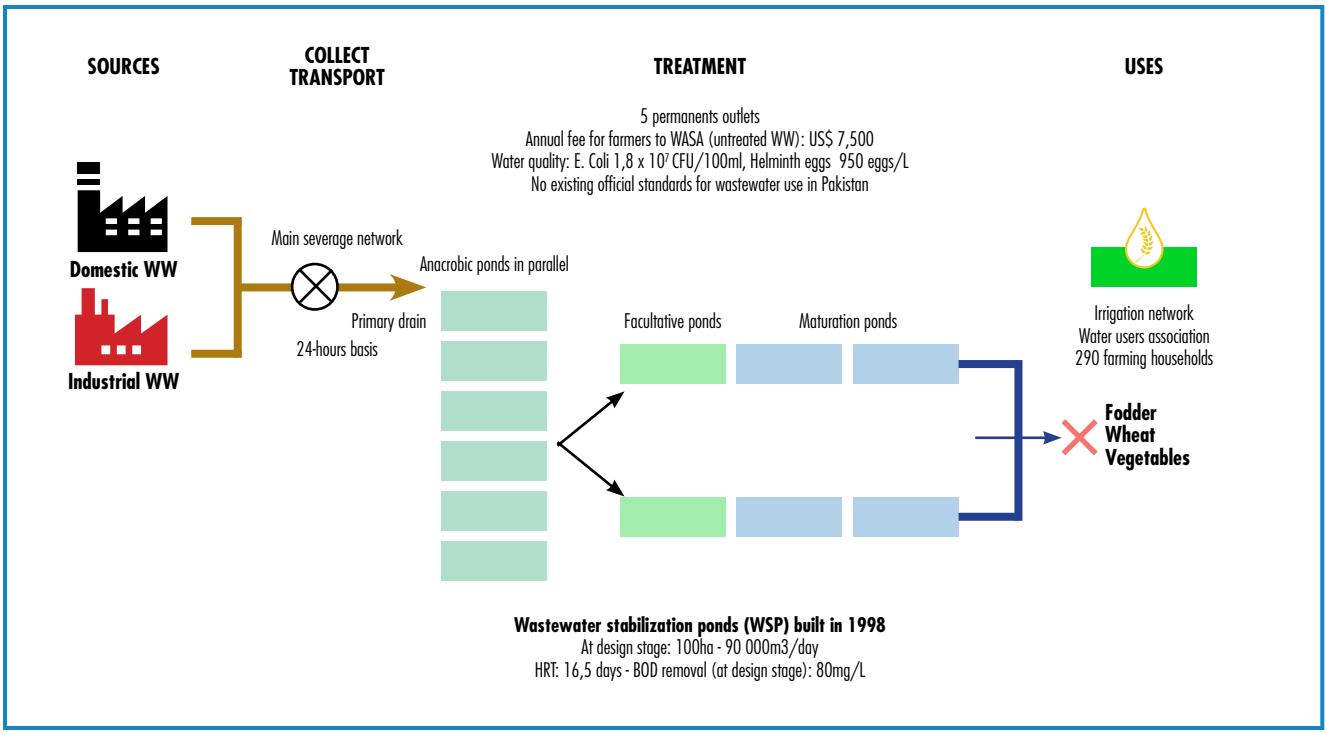
Les EUT des bassins sont considérées trop salines par les agriculteurs et avec des concentrations d'azote plus faibles que les EUB (confirmé par une étude menée pendant 1 an).

En moyenne, un agriculteur qui utilise les EUB tire un revenu de $600/ha, bien plus qu' un agriculteur qui utilise de l'eau conventionnelle pour l'irrigation. Les agriculteurs qui utilisent les EUB cultivent des cultures à plus haute valeur ajoutée (principalement des légumes), avec une intensité culturale plus élevée, et n'appliquent pas d'autres engrais que ceux qu'apportent les EUB. En ville, les légumes irrigués avec des EUB sont vendus presque 2 fois moins chers que ceux irrigués avec des eaux conventionnelles.

En outre les terres irriguées avec des EUB sont 2,5 fois plus chère que d'autres terres irriguées proches (meilleure fertilité).

Risques sanitaires:
Des études sanitaires ont été effectuées dans la zone agricole irriguée avec des EUB. Elles ont mis en évidence une faible prévalence des infections de nématodes intestinaux et aucun niveau élevé de métaux lourds dans les sols et ni dans les produits agricoles.

FIGURE 24 : La filière de réutilisation à Faisalabad (Pakistan) - Schéma Ecofilae



PROJET 3
La filière de réutilisation dans le district de Thanh Tri à Hanoï (Viet Nam)

Contexte et Objectifs du projet

La pénurie d'eau et la réutilisation non contrôlée des eaux usées brutes dans la zone périurbaine de Hanoï sont les principaux moteurs du projet. L'objectif du projet est d'aller vers des pratiques plus sûres et plus productives.

Acteurs, Opérateurs et Bailleurs de fonds

La Coopérative Agricole de Than Liet exploite le système d'approvisionnement en eau, le traitement, le drainage et l'irrigation. Les agriculteurs sont directement impliqués dans l'exploitation et la maintenance.

Filière technique

Des lagunes aérées sont utilisées pour traiter les eaux usées. Un faible traitement combiné avec de la dilution et des mesures de contrôle de la protection de la santé assurent la réutilisation sûre des eaux usées pour l'irrigation de rizières, de légumes et pour la production aquacole.

La filière de réutilisation est décrite dans la Figure 25 ci-dessous.

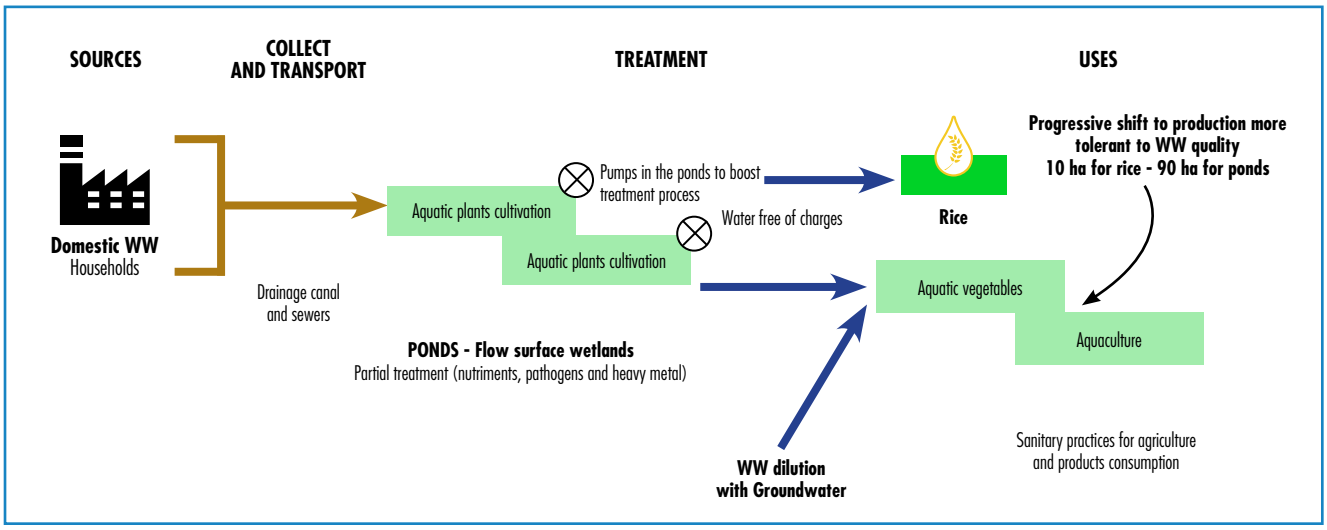
Freins rencontrés et solutions mises en œuvre

La production agricole et le choix des cultures s'orientent progressivement vers des usages plus tolérants aux eaux usées : les rizières diminuent au profit de l'aquaculture et des légumes aquatiques.

Le niveau de traitement est faible, et les risques de contamination sont encore élevés. Des mesures de contrôle de la protection de la santé ont été mises en œuvre pour protéger les agriculteurs et les consommateurs (gants et bottes pour les agriculteurs, cuisson des légumes, etc.).

Plantes aquatiques cultivées à Hanoï – Source : Jordan and Marisa Magnuson

FIGURE 25 : La filière de réutilisation dans le district à Hanoï (Viet Nam) - Schéma Ecofilae



PROJET 4
La filière de réutilisation à Settat (au Maroc)

(Littérature, complété par l'intervention de Pierre Louis Mayaux, CIRAD, lors de l'ICID2015)

Contexte et objectifs du projet

Les EUB ont longtemps et largement été valorisées sur le territoire, et la REUT s'est donc mise en marche de facto après l'installation de la station d'épuration. Elle a été globalement bien acceptée et tolérée. La REUT s'est donc développée spontanément sur la base d'arrangements sociaux préexistants.

Les principaux avantages du projet sont la préservation des eaux souterraines menacées (pollution et surexploitation), mais aussi la limitation de la REUB (objectifs sanitaires) dans la zone péri-urbaine.

Acteurs, Opérateurs et Bailleurs de fonds

Les parties prenantes et les opérateurs sont nombreux sur le projet, et les tâches et responsabilités sont partagées comme suit :

- la RADEEC (Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de la Chaouia) est en charge de la station d'épuration ;
- l'ONSSA (Office national de sécurité alimentaire des produits alimentaires) vérifie la qualité de la production agricole ;
- l'AUEA (Association d'Usagers de l'Eau Agricole) est en charge des infrastructures d'irrigation.

Les relations étaient historiquement bonnes entre les agents locaux de l'Etat et les agriculteurs. La BEI (Banque européenne d'investissement) a accordé un prêt de 8 M€ pour le projet.

Filière technique

La filière technique de REUT est décrite dans la Figure 26.

Les eaux usées traitées sont utilisées (4.2 m³/an) après un traitement par lagunage, pour irriguer un périmètre public de 300 ha (blé, maïs, bersim, pommes de terre, oliviers ...) dans la région péri-urbaine de Settat. L'investissement initial pour le réseau et les systèmes d'irrigation a été d'environ 3 M€. Les charges annuelles pour l'irrigation sont estimées à 67 000€ par an.

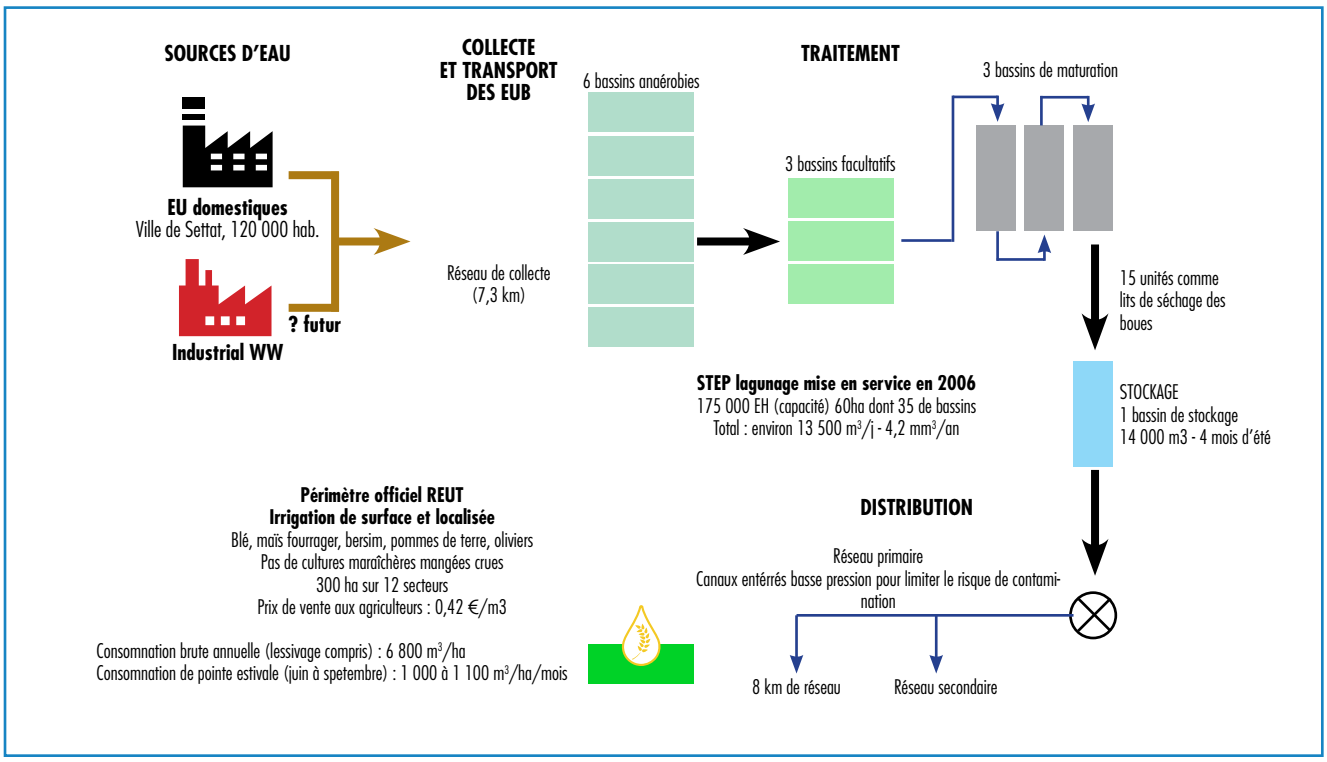
Le coût de l'eau est de 0.42€/m³ pour les agriculteurs.

Freins rencontrées et solutions mises en œuvre

Le projet s'est bien développé, malgré des cadres institutionnels et juridiques marocains encore incomplets et un grand nombre d'acteurs à coordonner.
La salinité des eaux usées traitées est une préoccupation majeure. Ce risque pourrait être amplifié si les eaux usées industrielles intégraient le réseau de collecte.

Lagunes de traitement Settat (Maroc) – Mayaux ICID 2015

FIGURE 26 : La filière de réutilisation à Settat au Maroc - Schéma Ecofilae



PROJET 5
La filière de réutilisation à Ouagadougou (Burkina Faso)

Contexte et objectifs du projet

Les principaux objectifs du projet étaient de :

- limiter la REUB dans la zone péri-urbaine dans un contexte d'urbanisation rapide et incontrôlée ;
- contrôler la REUT.

Acteurs, Opérateurs et Bailleurs de fonds

L'Office National de l'Eau et de l'assainissement (ONEA) est en charge de la gestion du projet.

L'investissement initial de la station d'épuration (9,85 M€) a été apporté par l'Agence française de développement (71,1 %), la Banque mondiale (8,1 %) et ONEA (8,6 %).

Filière technique

La filière technique de REUT est décrite dans la Figure 27.

Les eaux usées domestiques et industrielles sont traitées dans un système de lagunage (adapté au contexte climatique local), incluant des lagunes de maturation. Les EUT sont ensuite introduites par gravité dans le réseau d'irrigation. Un périmètre public (irrigation restrictive) et un périmètre non public (pas d'assolement obligatoire) sont irrigués, avec des eaux usées traitées fournies gratuitement aux agriculteurs.

Freins rencontrés et solutions mises en œuvre

Du fait des eaux usées industrielles présentes dans le réseau, des niveaux élevés de salinité ont été observés dans les EUT. Un prétraitement sur les sites industriels a été mis en œuvre. Néanmoins les sols irrigués restent affectés par la salinité des EUT.

L'ONEA avait des difficultés pour atteindre l'équilibre financier. Les taxes d'assainissement ont été réajustées avec les coûts d'exploitation.

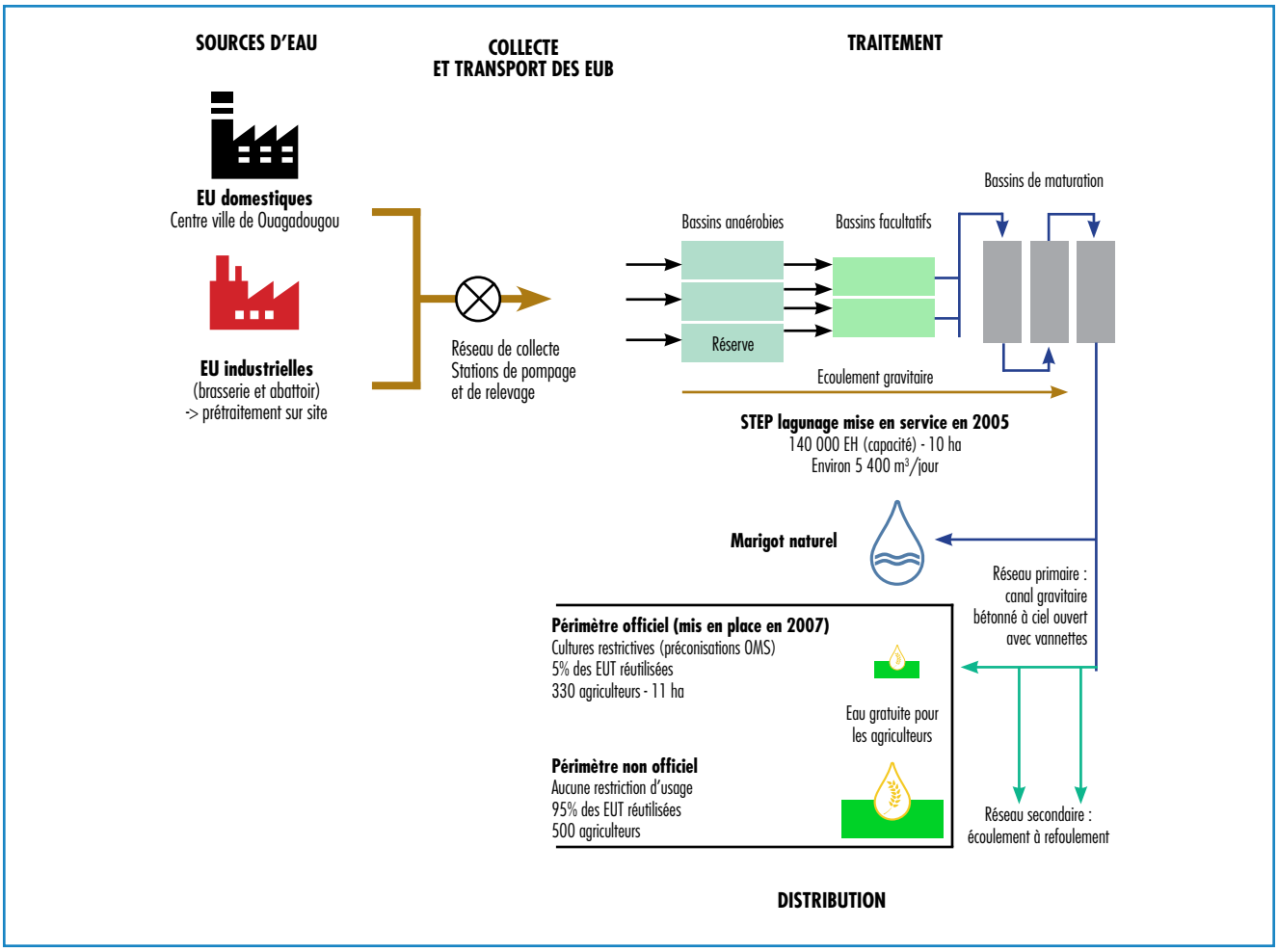
Des actes de vandalisme ont été signalés et peu de contrôles sont réalisés sur le réseau d'irrigation.

Des risques élevés de glissement de terrain, d'érosion et d'inondation sont signalés sur les périmètres agricoles.

Les agriculteurs manquent de capacités techniques et financières.

Le périmètre public n'est pas compétitif du fait de l'irrigation restrictive et du morcellement des terres.

FIGURE 27 : La filière de réutilisation à Ouagadougou - Schéma Ecofilae



PROJET 6
La filière de réutilisation à Okhla Delhi (India)

Contexte et objectifs du projet

Dans un contexte urbain avec des pénuries d'eau importantes l'objectif principal du projet est de fournir plus d'eau pour les différents usages à Delhi.

Acteurs, Opérateurs et Bailleurs de fonds

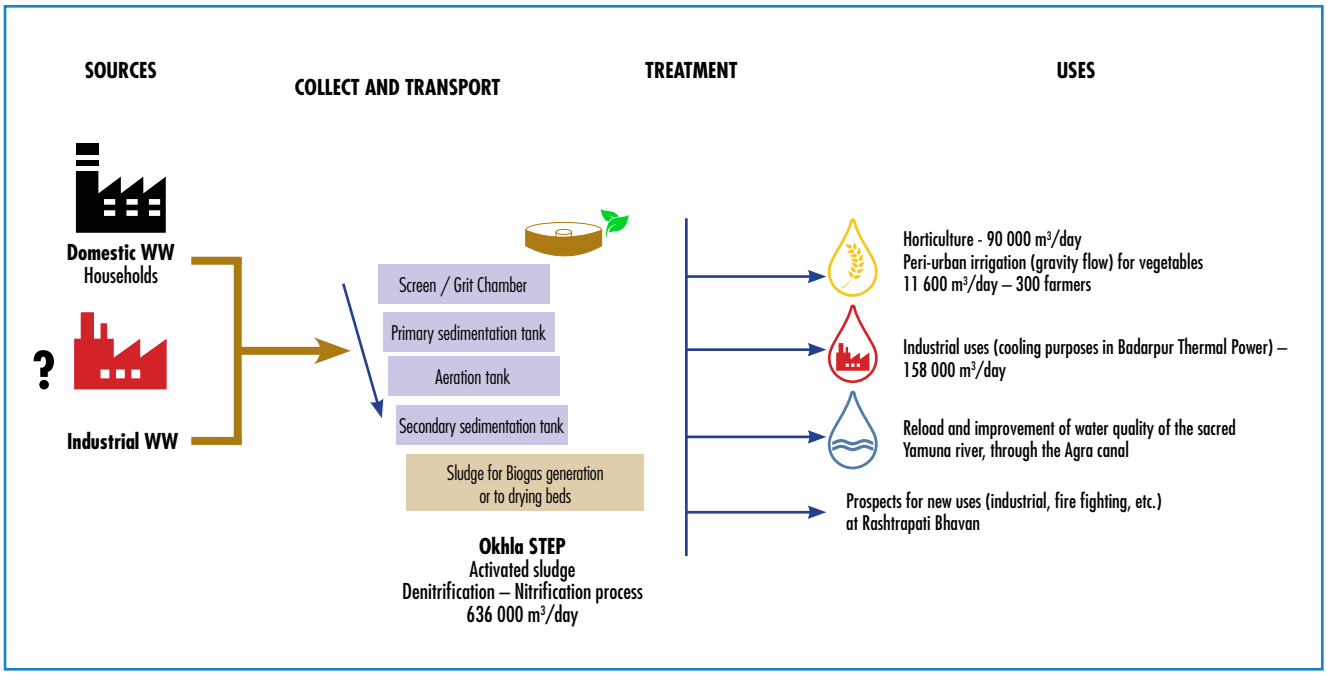
Le projet a été soutenu par l'USAID. Le Delhi Jal Board est responsable de la STEP et de la distribution des EUT.

Filière Technique

La filière de réutilisation est décrite dans la Figure 28 ci-dessous.

Les eaux usées traitées dans le système à boues activées sont vendues pour différents usages : agriculture (37 mm^3/an) et refroidissement industriel (58 mm^3/an). Le Delhi Jal Board prospecte pour de nouveaux usages. Les EUT sont également utilisées pour recharger et améliorer la qualité de l'eau de la rivière Yamuna.

FIGURE 28 : La filière de réutilisation à Okhla Delhi (India) - Schéma Ecofilae



PROJET 7
Expérience à Dakar et ailleurs au Sénégal

L'approvisionnement alimentaire et l'emploi dans la région de Dakar (près de 2,5 millions d'habitants au total) dépendent des agricultures urbaine et péri-urbaine, elles-mêmes dépendantes de l'approvisionnement en eau. Rares sont les ressources en eau douce de qualité et les eaux souterraines courent des risques élevés de salinisation et de contamination par des rejets d'eaux usées incontrôlés. Bien qu'interdits, les rejets d'eaux usées non traitées sur les terres agricoles sont une pratique courante.

Dans le quartier de **Pikine à Dakar**, environ 16 ha sont irrigués depuis des années avec des EUB. Les 160 agriculteurs réutilisent presque 2 mm^3 d'eaux usées par an (3% de la production annuelle de Dakar des eaux usées) pour irriguer des légumes (laitues). Les agriculteurs détournent les eaux usées depuis les conduites de collecte avec des tuyaux, pour alimenter des petits puits situés dans leur parcelle. Ils utilisent ensuite des boîtes de conserves pour arroser au champ. Les pratiques de REUB sont néanmoins réduites en raison des mises à niveau et de l'expansion du système d'assainissement de la ville. Les EUT de la récente station d'épuration à Pikine sont désormais réutilisées pour l'irrigation et comme un moyen de limiter les processus de salinisation des sols et des eaux souterraines dans la région.

Dans le quartier de Cambérène à Dakar, l'ONAS (Office National de l'Assainissement du Sénégal) et l'union des agriculteurs projettent de transférer et de réutiliser les EUT vers la vallée des Niayes, principalement pour la production horticole. Ce projet est financé par la FAO et la Coopération Espagnole. L'ONAS s'engage à fournir des eaux usées traitées à un prix ne dépassant pas 50 FCFA/m^3 après le traitement tertiaire et 20 FCFA/m^3 après le traitement secondaire.

Les eaux usées traitées des villes de Thiès et Saly-Mbour sont réutilisées pour la production agricole. Peu de données sont disponibles sur ces deux projets, situés non loin de Dakar.

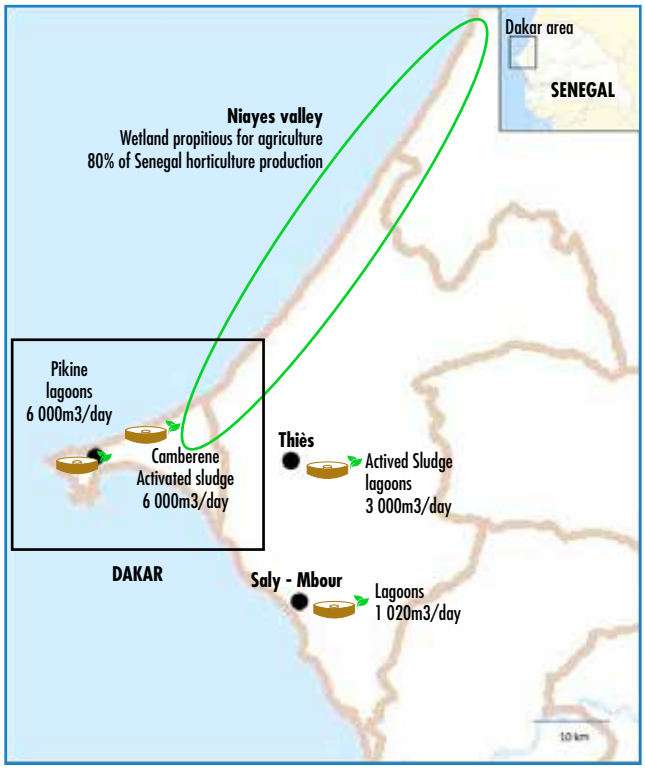


FIGURE 29 : Localisation d'expériences de réutilisation au Sénégal - Schéma Ecofilae

PROJET 8
La filière de réutilisation à Korba (Tunisie)

Contexte et objectifs du projet

Les ressources en eau douce sont rares et précieuses dans la région de Korba, en Tunisie. Les eaux souterraines sont surexploitées (par l'agriculture) et les risques de pollution et de salinisation sont avérés. Les principaux objectifs du projet sont :

- recharger la nappe et ainsi limiter sa surexploitation ;
- fournir de l'eau de bonne qualité aux agriculteurs ;
- préserver l'environnement : la côté, les eaux souterraines, les lagons (sebkha).

Acteurs, opérateurs et bailleurs de fonds

Le projet a été financé par l'Etat Tunisien (100 %) en 2002. L'ONAS (Office National de l'Assainissement) and CRDA (Office Régional de Développement Agricole) sont respectivement en charge du traitement et de la réinjection tandis qu'un GDA (Groupe de Développement Agricole) est en charge des prélèvements agricoles dans l'aquifère.

Filière technique

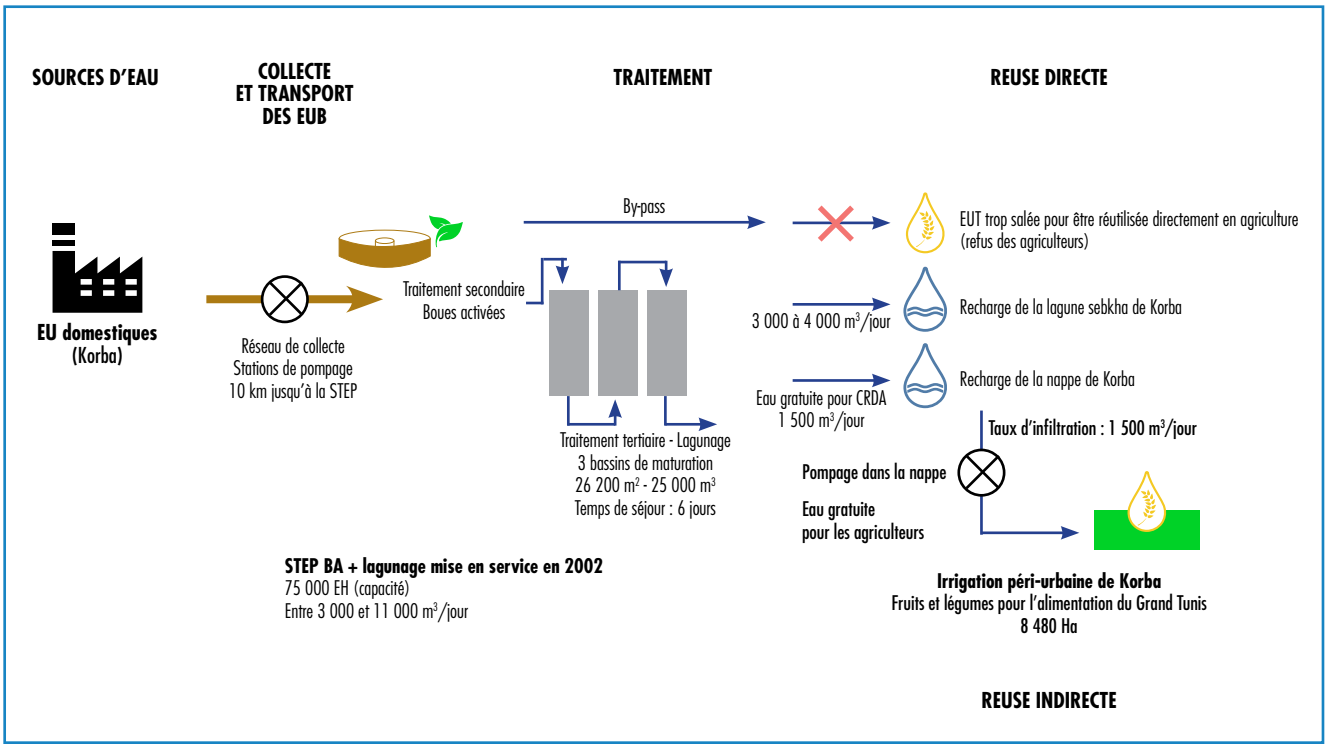
La filière technique de réutilisation des eaux uses est décrite dans la Figure 30 ci-dessous.

Les EUT servent à recharger un lagon naturel (sebkha) en sortie de traitement tertiaire (lagunage après boues activées). Un volume de 1 500 m³ d'EUT est infiltré chaque jour dans des bassins spécifiques pour recharger l'aquifère de Korba. La réutilisation pour l'agriculture est indirecte : les agriculteurs prélèvent dans l'aquifère pour irriguer en périphérie de Korba.

Freins rencontrés et solutions mises en œuvre

La salinité des EUT était un problème pour les agriculteurs qui ont refusé d'utiliser directement ces eaux en sortie de traitement. Après un séjour et une dilution dans la nappe, la salinité des eaux prélevées est encore élevée mais la qualité est compatible avec l'usage agricole. Ainsi, la recharge de la nappe permet également de limiter les intrusions salines marines.

FIGURE 30 : La filière de réutilisation à Korba en Tunisie - Schéma Ecofilae



PROJET 9
La filière de réutilisation au Nord de la Bande de Gaza dans les Territoires Palestiniens– le projet NGEST (non mis en œuvre en 2014)

Contexte et objectifs du projet

La station d'épuration de Beit Lahia est en surcharge et l'eau est mal traitée avant d'être rejetée dans un lac où l'infiltration est très faible avec des risques élevés de contamination des eaux souterraines.

Le projet NGEST intègre la construction d'une nouvelle station d'épuration (Jabalya) et des bassins d'infiltration supplémentaires, mais également un pompage des eaux souterraines pour alimenter des zones irriguées.

Ces objectifs principaux sont

- Soutenir l'agriculture et réinstaller des agriculteurs sur leurs terres non mises en cultures (en fournissant une source supplémentaire d'irrigation);
- Résoudre le problème sanitaire causé par des rejets d'eaux usées mal traitées qui rejoignent un lac et la nappe (utilisée pour la production d'eau potable).

Acteurs, opérateurs et bailleurs de fonds

Le gestionnaire principal du projet est la Palestinian Water Authority. Le financement provient des agences de développement française, suédoise et belge, mais également de la Banque mondiale et de l'Union européenne.

Une fois terminé, le projet sera remis aux Coastal Municipalities Water Utilities (CMWU). Les CMWU en collaboration avec les municipalités, et à travers les associations d'agriculteurs, devront améliorer progressivement le taux de recouvrement pour couvrir les coûts d'exploitation et de maintenance, et assurer la livraison et l'utilisation efficace de l'eau traitée.

Filière technique

Dans le projet NGEST, les eaux usées traitées par la station d'épuration à boues activées de Jabalya sont indirectement réutilisés par les agriculteurs après infiltration dans la nappe puis pompage. Plus de 2 300 ha sont prévus d'être irrigués d'ici 2025.

La filière de traitement de la station d'épuration de Jabalya est un procédé à boues activées, comprenant digesteurs, souffleuses et les détenteurs de gaz. Les boues sont déshydratées et stockées. Une maquette de la station d'épuration est présentée dans la figure 31 ci-dessous.

L'ensemble de la filière de réutilisation des eaux usées est représenté dans la Figure 32.
Le projet de REUT est mis en œuvre en 3 étapes :

- Étape 1 en 2015: les eaux usées produites à partir de 2009 par la station de Beit Lahia sont réinjectées dans l'aquifère (estimées à 20 mm^3 au total). L'équivalent en eau de la production journalière de la station de Beit Lahia sera pompé pour alimenter le réseau d'irrigation ;
- Étape 2 en 2020: un pompage de 39 000 m^3 par jour alimente le réseau d'irrigation à partir des eaux usées traitées de la station de Jabaliya ;
- Étape 3 en 2025: 30 000 m^3 supplémentaires par jour seront pompés lorsque la capacité de la station d'épuration de Jabaliya sera augmentée.

Avant le projet, seulement 233 ha était irrigués (agrumes, oliviers, fourrage, arbres fruitiers, mais pas de légumes). L'objectif officiel est d'atteindre 2 300 ha en 2025. Une longueur de 103 km de réseau est prévue. Avec l'Etape 3, l'eau pourrait être transférée vers d'autres zones. Le coût de l'eau envisagé est de 0.23 €/m^3.

La station d'épuration va fonctionner énergétiquement grâce au méthane généré au cours du processus de traitement et à des panneaux solaires.

Freins rencontrés et solutions mises en œuvre

La mauvaise coordination des différents organes de la PWA a été contraignant au début du projet.

Les eaux usées de la station d'épuration de Beit Lahia ont contaminé les eaux souterraines. Un programme de surveillance est maintenant sur place pour assurer la sécurité de l'eau infiltrée (des deux stations Beit Lahia et Jabalya) et de l'eau livrée, avec une modélisation journlière de l'eau souterraine pour examiner les modèles d'expansion du panache.

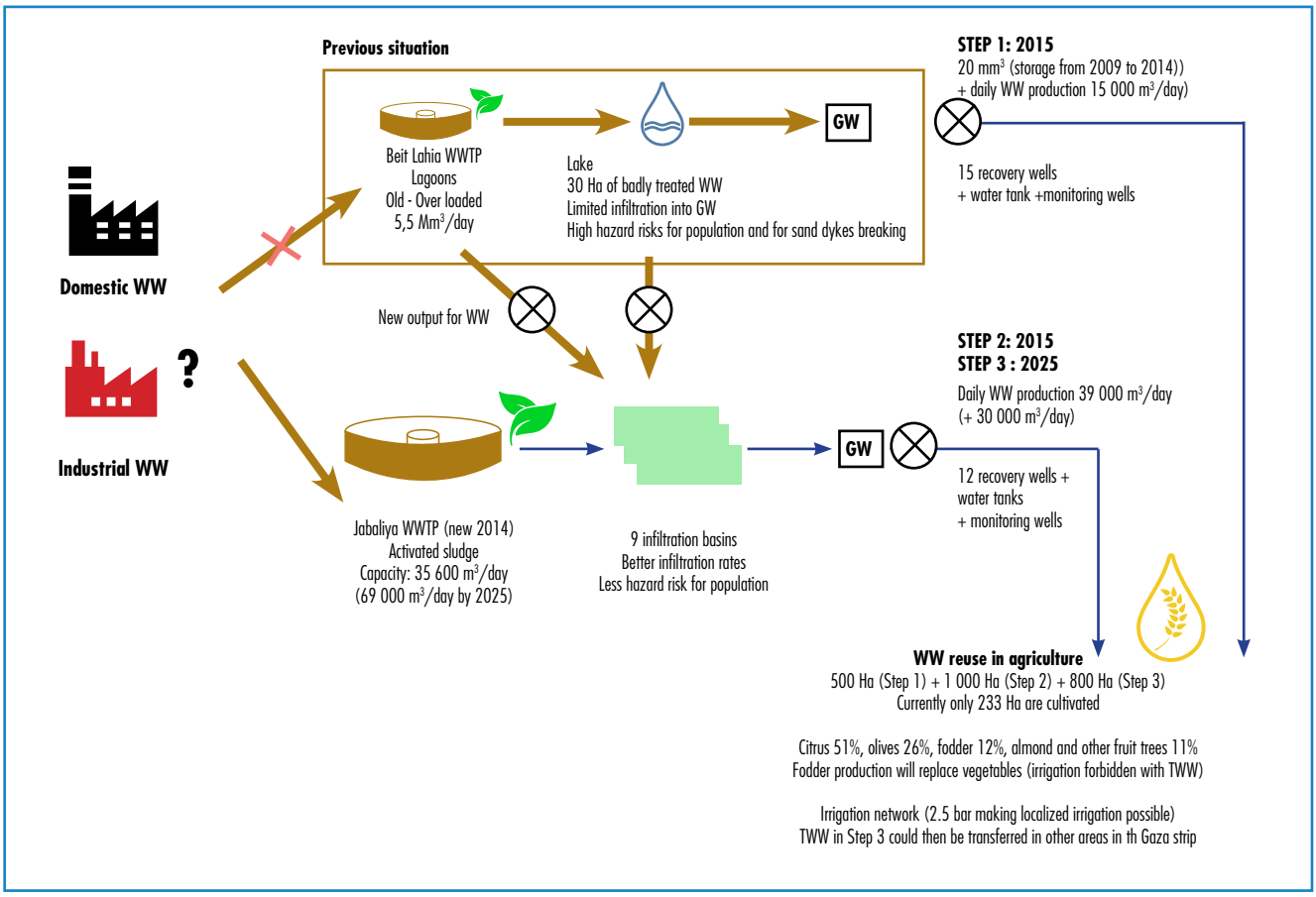
FIGURE 31 : Maquette de la station d'épuration de Jabaliya – ICID 2015

L'approvisionnement en énergie des stations d'épuration et les coupures de courant régulières constituent un véritable challenge. L'énergie fournie via des générateurs d'appoint, des panneaux solaires et de la méthanisation devrait sécuriser la station d'épuration en permanence et le périmètre irrigué durant la journée.

Les principaux défis pour le volet agricole sont:

- les eaux souterraines pompées ont des niveaux élevés de chlorure et de nitrates. Les agriculteurs se tournent alors vers les cultures d'oliviers et d'agrumes qui supportent de tels niveaux ;
- la question sécuritaire (proximité avec la ligne verte, impossibilité de cultiver des cultures supérieures à 1 mètre à une certaine distance du mur, les tirs meurtriers réguliers, etc.) est une menace pour les agriculteurs ;
- La compétitivité de l'agriculture est limitée en raison de la situation économique dans la bande de Gaza ;
- La concurrence sur les terres est élevée dans un contexte de croissance démographique dans bande de Gaza ;
- Les mécanismes de financement pour couvrir les besoins des agriculteurs en main d'œuvre et en investissement sont très limités ;
- L'environnement institutionnel est faible et manque de soutien technique et de conseils aux agriculteurs ;
- La sensibilisation et l'acceptabilité des agriculteurs étaient très limitées: ce problème a en partie été résolu grâce à des associations d'usagers efficaces.

FIGURE 32 : La filière de réutilisation au Nord de la Bande de Gaza dans les Territoires Palestiniens– le projet NGEST - Schéma Ecofilae



PROJET 10
La filière de réutilisation à Harare (Zimbabwe)

Contexte et objectifs du projet

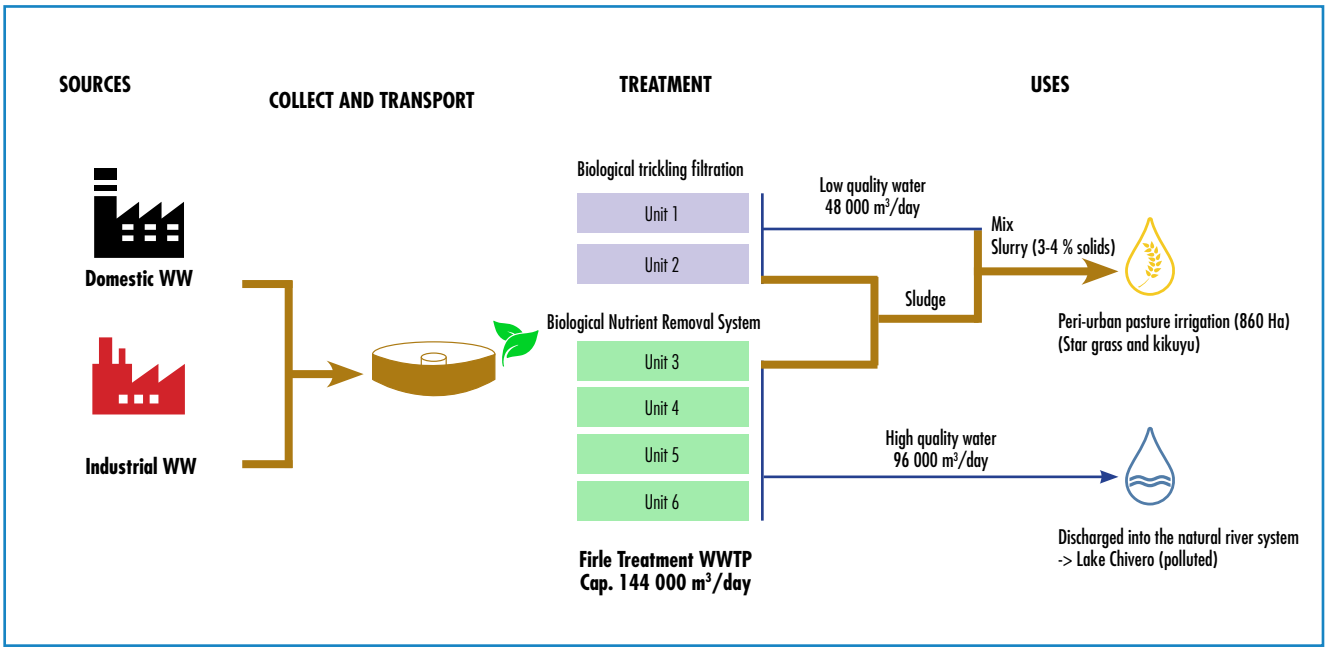
Ce projet a été développé et mis en œuvre dans un contexte de rareté de l'eau (besoin de plus de ressources en eau).

Filière de réutilisation

La filière de réutilisation est décrite dans la Figure 33 ci-dessous.

Dans la station d'épuration de Firle, deux chaînes de traitement ont été mises en œuvre et adaptées aux différents usages finaux. Un système d'élimination biologique des nutriments traite l'eau qui est rejetée dans une rivière naturelle. Un système de filtres percolateurs biologiques traite l'eau (boues – matières en suspensions) ensuite réutilisée pour irriguer des pâturages.

FIGURE 33 : La filière de réutilisation à Harare (Zimbabwe) - Schéma Ecofilae



PROJET 11
Expérience de la ville de Bogota (Colombie) - USAID 2012

La réutilisation des eaux usées est inclue dans le système intégré de gestion de l'eau de la ville de Bogota. Elle est stratégique même si les ressources en eau douce sont abondantes.

Il y a plusieurs années, les agences de l'énergie ont développé un système de production hydroélectrique pour utiliser l'eau de la rivière Bogota, en aval de la ville de Bogotá. Le système satisfait environ 20% des besoins énergétiques de la ville et 7% des besoins du pays. Pour cette raison, le débit et la qualité de la rivière Bogotá sont considérés comme une priorité nationale par le gouvernement colombien et sont essentiels à la stabilité économique du pays.

Néanmoins les eaux usées de la ville sont rejetées (partiellement traitées et non traitées) dans la rivière Bogota conduisant à des ressources en eau de faible qualité pour les zones péri-urbaines agricoles et la production d'énergie. L'utilisation d'eau de faible qualité (de la rivière Bogota) dans le secteur agricole a également conduit à des niveaux de salinité élevés du sol.

Deux stations d'épuration ont été planifiées pour améliorer la qualité des eaux et pour contrôler les rejets : la station de Salitre fin des années 90, et la station de Canoas d'ici 2016. Les agriculteurs périurbains dans le district de Ramada seront en mesure de réutiliser directement les eaux usées traitées. Ils cesseront de puiser de l'eau sur la rivière Bogotá (préservation des débits pour la production hydro-électrique) et les périmètres agricoles péri-urbains pourraient être étendus. Les conditions agronomiques (salinité) seront également améliorées.

PROJET 12
Expériences en Lybie

En Lybie, à Hadba El Khadra (5 km de Tripoli), la réutilisation des eaux usées a commencé en 1971. Les eaux usées étaient traitées dans une station d'épuration « classique », suivie d'un traitement d'infiltration sur sable puis de chloration (12 mg/l). Les eaux usées épurées étaient ensuite pompées et stockées dans des réservoirs d'une capacité de stockage de 3 jours. Une surface de 3 000 ha de fourrages, de légumes et de plantations brise-vent sur les sols sableux étaient irrigués. Un volume de 110 000 m3/jour était utilisé et appliqué à l'aide des pivots d'aspersion (Angelakis 1999).

La réutilisation s'est également mise en place à Al Marj (au nord-est de Bengazi, 50 000 habitants) après une épuration des eaux par traitement biologique, filtration sur sable, chloration et stockage.

Aucune évaluation de ces projets n'a pu été recueillie pour la présente étude. Il se pourrait qu'ils ne soient plus opérationnels en 2015.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahmed, M. T. (2010). "Life Cycle Analysis in Wastewater: A sustainability perpective." Wastewater treatment and reuse in the Mediterranean Region.
- Angelakis, M. d. M., Bontoux, Asano (1999). "The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines." Pergamon - Elsevier Science 33(N°10): 2201-2217.
- Asano, J. a. (2008). "Water reuse: An international survey of current practice, issues and needs."
- Barcelo, P. (2010). "Waste Water treatment and Reuse in the Mediterranean Region." Springer.
- Bashaar (2007). "Wastewater reuse in Jordan: Present status and future plans." Desalination 211(1-3): 164-176.
- Bon Hubert (ed.), K. R. e. C.-F.-D. (2004). "Journées de septembre CIRAD-FLHOR 2004 : réunion agriculture périurbaine."
- Carns (2005). "Bringing energy efficiency to the water & wastewater industry: how do we get there?" WEFTEC Proceedings.
- CGIAR, I. (2012). "Global Experiences in Water Reuse - Resource recovery & Reuse Series 4."
- Choukr'Allah, R. (2010). "Innovative Wastewater treatments and Reuse Technologies Adapted to Southern Mediterranean Countries." Springer.
- Condom, L., Vandome (2012). "Treated Wastewater reuse in the Mediterranean: lessons learned and tools for project development." Blue Plan Papers 11.
- Deslauriers, K., Bulkley, Keoleian (2004). "CSS Factsheets, US Wastewater treatment system."
- Drechsel, K. (2014). "Irrigated Urban Vegetable Production in Ghana: Characteristics, Benefits and Risk Mitigation - Second Edition."
- Drechsel, K., IWMI (2014). "Irrigated urban vegetable production in Ghana: characteristics, benefits and risk mitigation."
- Drechsel, S., Raschid-Sally, Redwood, Bahri (2010). "Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries."
- Gallopin (1997). "Indicators and their use: information for decision-making."
- Guinee (2001). "LCA: an operational guide to the ISO standards CML."
- Harder, R., Heimersson, S., Svanström, M., and Peters, G. M (2014). "Including Pathogen Risk in Life Cycle Assessment of Wastewater Management. 1. Estimating the Burden of Disease Associated with Pathogens." Environmental science & technology 48: 9438-9445.
- Heimersson, S., Harder, R., Peters, G. M., and Svanström, M. (2014). "Including Pathogen Risk in Life Cycle Assessment of Wastewater Management. 2. Quantitative Comparison of Pathogen Risk to Other Impacts on Human Health." Environmental science & technology 48: 9446–9453.
- Hellweg, S. a. M. i. C., L. (2014). "Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment." Science (New York, N.Y.) 344(6188): 1109–1113.
- Kallel, B., Ayoub, Ayabi, Ksibi (2012). "Effects of Treated Wastewater Irrigation on Soil Salinity and Sodicity at El Hajeb Region (Sfax-Tunisia)." Journal of Arid Land Studies.
- Kampa (2010). "Constraints of application of wastewater treatment and reuse in mediterranean partner countries."
- Loiseau, E., Junqua, G., Roux, P., and Bellon-Maurel, V. (2012). "Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods. ." Journal of environmental management 112C(213–225).
- Loiseau, E., Roux, P., Junqua, G., Maurel, P., and Bellon-Maurel, V. (2013). "Adapting the LCA framework to environmental assessment in land planning." The International Journal of Life Cycle Assessment 18(8): 1533–1548.
- Loubet, P., Roux, P., Loiseau, E., and Bellon-Maurel, V. (2014). "Life cycle assessments of urban water systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature." Water Research 67(0): 187–202.
- Loubet, P., Roux, P., Núñez, M., Belaud, G., and Bellon-Maurel, V. (2013). "Assessing Water Deprivation at the Sub-river Basin Scale in LCA Integrating Downstream Cascade Effects." Environmental science & technology 47(24): 14242–14249.
- Moustier P. (ed.), M. A. e., De Bon H. (ed.), Guérin H. (ed.), Pagès J. (ed.) (1999). "Agriculture périurbaine en Afrique subsaharienne : actes de l'atelier international du 20 au 24 avril 1998, Montpellier, France."
- ONEMA - Loubier, D. (2013). "Analyses coûts-bénéfices sur la mise en oeuvre de projets de réutilisation des eaux usées traitées (REUSE)."
- Paule Moustier, J. P. (1997). "Le péri-urbain en Afrique : une agriculture en marge ?" economie rurale 241(1): 48-55.
- Risch, E., Gutierrez, O., Roux, P., Boutin, C., and Corominas, L. (2015). "Life cycle assessment of urban wastewater systems: Quantifying the relative contribution of sewer systems." Water Research 77: 35–48.
- Risch, E., Loubet, P., Núñez, M., and Roux, P. (2014). "How environmentally significant is water consumption during wastewater treatment? : Application of recent developments in LCA to WWT technologies used at 3 contrasted geographical locations." Water Research 57: 20–30.
- Risch, E., Roux, P., Boutin, C., and Héduit, A. (2012). "L'analyse de cycles de vie (ACV) des systèmes d'assainissement : un outil complémentaire d'aide à la décision." Sciences Eaux et Territoires 09: 82–91.
- Sanghi, S. a. (2013). "Wastewater Reuse and Management." Springer Science+Business Media Dordrecht.

Sato, Q., Yamamoto, Endo, Zahoor (2013). "Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use." Agricultural Water Management 130: 1-13.

- Scott (2010). "Wastewater Irrigation and Health: Challenges and Outlook for Mitigating Risks in Low-Income Countries."
- Seidu, D. a. (2011). "Cost-effectiveness of options for reducing health risks in areas where food crops are irrigated with treated or untreated wastewater."
- Thi Trinh, H. V., Van Der Steen, Lens (2013). "Climate Change Adaptation Indicators to Assess Wastewater Management and Reuse Options in the Mekong Delta, Vietnam." Water Resources Management.
- USAID, E.-. (2012). "Guidelines for Water Reuse."
- USEPA (2008). "Inventory of GHG emissions and sinks: 1990-2006."
- USEPA (2012). "Guidelines for Water Reuse."
- Valentina Lazarova, A. B. (2004). "Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grasses." CRC Press.
- Verlicchi (2012). "A project of reuse of reclaimed wastewater in the Po Valley, Italy: Polishing

sequence and cost benefit analysis." Journal of Hydrology(432-433): 127-136.

- Volkman (2003). "Sustainable wastewater treatment and reuse in urban areas of the developing world."
- Wathern (1988). "EIA: theory and practice."
- Wei, W., Larrey-Lassalle, P., Faure, T., Dumoulin, N., Roux, P., and Mathias, J.-D. (2015). "How to Conduct a Proper Sensitivity Analysis in Life Cycle Assessment: Taking into Account Correlations within LCI Data and Interactions within the LCA Calculation Model." Environmental science & technology 49(1): 377–385.
- Wetson (1997). "Planning and environmental impact assessment practices. Addison Wesley Longman, Harlow."
- WHO (2006). "Guideline for the safe use of wastewater, excreta and wastewater."
- Zemmouri (2011). "De l'eau usée vers le biogaz." Recherche et Développement - Algeria CDER bulletins.
- Les conférences de l'ICI sont téléchargeables sur https://icid2015.sciencesconf.org/

BIBLIOGRAPHIE SPÉCIFIQUE AU CHAPITRE 4 DE LA PARTIE 2

- ABERS Rebecca Neaera and KECK Margaret E. (2013), Practical Authority: Agency and Institutional Change in Brazilian Water Politics (New York and Oxford: Oxford University Press, 2013.
- AGGERI, Franck (2005), « Les régimes de gouvernementalité dans le domaine de l'environnement », in Armand HATCHUEL, Eric PEZET, Ken STARKEY, Olivier LENAY. Gouvernement, organisation et gestion: l'héritage de Michel Foucault, Presses Universitaires de Laval, p.431-464.
- CAPOCCIA, Giovanni (2015), "Critical Junctures and Institutional Change" in James Mahoney and Kathleen Thelen (eds.), Advances in Comparative-Historical Analysis, chap. 6, p. 147-179, Cambridge University Press, Cambridge.
- DOLOWITZ, David P., MARSH David (2000), "Learning from Abroad: The Role of Policy Transfer in Contemporary Policy-Making", Governance, 13 (1), p. 5-23.
- DUBOIS, Vincent (2008), La vie au guichet. Relation administrative et traitement de la misère, Économica.
- ENSINK, J., MAHMOOD, T., VAN DER HOEK, W., RASCHID-SALLY, L. and AMERASINGHE, F. (2004), "A nation-wide assessment of wastewater use in Pakistan: An obscure activity or a vitally important one?", Water Policy, vol 6, p. 197–206.
- GARRAUD, P. (1990), « Politiques nationales : l'élaboration de l'agenda », L'année sociologique, p. 17-41.
- HALL, P.A. (2009), Historical Institutionalism in Rationalist and Sociological Perspective. In James MAHONEY, Kathleen THELEN, Explaining Institutional Change: Ambiguity, Agency, and Power, New York, Cambridge University Press, p. 204-224.
- HECLO, H. (1974), Modern Social Policies in Britain and Sweden: From Relief to Income Maintenance, New Haven: Yale University Press.
- HILGARTNER, S., BOSK, C. (1988), "The Rise and Fall of Social Problems: A Public Arena Modelé, American Journal of Sociology, ç' (1), p. 53-76.
- HILL, M., HUPE, P. (2002), Implementing Public Policy, Londres, Sage.
- KINGDOM OF MOROCCO (2011), « Projet de Renforcement des Capacités sur l'Utilisation sans danger des Eaux Usées en Agriculture », National Report, December.
- KINGDON, J.W. (1984). Agendas, Alternatives, and Public Policies, Boston: Little Brown.
- LASCOUMES, Pierre, BONNAUD, Laure, LE BOURHIS, Jean-Pierre, MARTINAIS, Emmanuel (2014), Le développement durable. Une nouvelle affaire d'État, Paris, Presses universitaires de France.
- LIPSKY, M. (1980), Street-Level Bureaucracy : Dilemmas of the Individual in Public Services, New York, Russel Sage Fuondations.
- MAHONEY, James, THELEN, Kathleen, Explaining Institutional Change: Ambiguity, Agency, and Power, New York, Cambridge University Press.
- PRESSMAN, Jeffrey L., WILDAVSKY Aaron (1973), Implementation: How Great Expectations in Washington Are Dashed in Oakland, University of California Press.
- RADAELLI, Claudio (2003), "The Europeanisation of public policy," in Kevin Featherstone and Claudio Radaelli (eds.), The Politics of Europeanisation, p. 27-56, Oxford: Oxford University Press.
- SCHMIDT Vivien A. (2008), Discursive Institutionalism: The Explanatory Power of Ideas and Discourse, Annual Review of Political Science, vol. 11, p. 303-326.
- SEPA/USAID (2004), Guidelines for Water Reuse. U.S. Environmental Protection Agency (EPA/625/R-04/108).
- STEINMO Sven, THELEN, Kathleen (1992), Structuring Politics: Historical Institutionalism in Comparative Analysis, Cambridge University Press.
- UNEP (2003), Wastewater reuse for agriculture.
- WHO (2006), Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 1: Policy and regulatory aspects
- WRI (2015), "Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings", Technical note, August.