



# REUTILISATION DES EAUX GRISES TRAITEES EN AGRICULTURE : EFFETS SUR LES PLANTES IRRIGUEES ET LE SOL

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT  
OPTION : EAU ET ASSAINISSEMENT

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 23-06-2014 par

**KABORE Yves Rodrigue Ahmed**

**Travaux dirigés par :**

**Ir. SAWADOGO Boukary**  
Ingénieur de recherche

**Mr. SANGARE Drissa**  
Doctorant

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. SOU Mariam

Membres et correcteurs : Ir. NFON DIBIE Jean Jacques Stéphane

Ir. SOSSOU Seyram

Ir. SAWADOGO Boukary

**Promotion [2013/2014]**

## **DEDICACE**

Je dédie ce mémoire de fin de cycle à toute ma famille et à mes amis. En particulier à mon Père KABORE T. Michel, à ma Mère SAWADOGO Fatoumata, à mon Frère Brice et à mes Sœurs Larissa et Danielle pour tous les sacrifices consentis afin que je puisse achever mes études.

## REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réussite de ce stage. Ces remerciements s'adressent en particulier :

A toute l'équipe du projet Ameli-EAUR pour m'avoir accueilli et suivi durant la période de stage de fin de cycle.

A mon maître de stage Mr. SAWADOGO Boukary, Ingénieur de recherche à 2iE, pour sa contribution et ses précieux conseils qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail ;

A Mr. SANGARE Drissa, doctorant à 2iE pour son aide, ses conseils, ses critiques et ses remarques qui ont fortement contribué à l'amélioration de ce travail ;

Au Dr. SOU Mariam, Enseignant Chercheure à 2iE et coordonnatrice du projet Ameli-EAUR;

Au Prof. LAHMAR Rabah pour ses explications et ses remarques ;

Au personnel du laboratoire LEDES spécialement à Messieurs HEMA Sohamäi, OUEDRAOGO Moustapha, ZONGO Bernard et TINDOURE Guy Noël, pour leur grand soutien et leur assistance technique durant la réalisation des analyses.

A mes collègues stagiaires du projet Améli-EAUR, OUEDRAOGO Danielle M. S., BROU Loukou Alexis, KAGABIKA GAJU Florence, pour leur assistance et leur aide dans la réalisation des activités menées durant ce stage ;

A Messieurs ZERBO Doumassè Innocent et ZONGO Emmanuel, pour leur assistance et pour leur appui technique sur le site expérimental;

Mr IDO Koualè qui nous a permis d'effectuer convenablement nos déplacements et de transporter nos échantillons ;

A tous mes amis et camarades de la filière Master 2 Eau et Assainissement, promotion 2013-2014;

A tous ceux qui par un mot, une phrase m'ont insufflé une idée, m'ont conseillé, qu'ils trouvent à travers ces lignes mes remerciements.

## RESUME

Les fortes pressions exercées sur les ressources en eau douce, du fait de leur raréfaction, font que celles-ci sont généralement réservées en priorité pour les usages humains. Face à cette situation, la recherche de nouvelles sources d'eau pour une activité consommatrice de grandes quantités d'eau telle que l'agriculture est indispensable. Dans ce contexte, les eaux grises semblent tenir une place de choix dans les politiques de réduction des pressions exercées sur les ressources en eau douce du fait de leur faible charge polluante et de leur disponibilité. C'est donc dans la perspective de la réutilisation des eaux grises traitées en agriculture sur le long terme que nous nous sommes proposé d'étudier les effets de cette réutilisation sur les sols irrigués et les plantes. Des plants de laitue (*Lactuca Sativa L.*) d'une variété locale (Pierre Bénite) ont été irrigués avec deux types d'eaux grises traitées à partir d'un système de bacs inclinés en milieu péri-urbain d'une part et d'un étang algal à haut rendement situé sur le campus de kamboinsé d'autre part. L'eau de puits a également été utilisée comme eau d'irrigation et l'eau de barrage a été utilisée comme traitement témoin. Les tests culturaux ont été réalisés de mars à mai 2014 pendant la saison chaude et les paramètres agronomiques (nombre de feuilles, rendement des feuilles) ainsi que les caractéristiques physico-chimiques du sol aux profondeurs 0-15 cm et 15-30 cm ont été étudiés. Les résultats obtenus révèlent que dans les conditions expérimentales mises en place, les plants issus des parcelles irriguées avec les eaux grises provenant des bacs inclinés ont eu une croissance et un rendement faible comparativement à ceux des plants issus des autres traitements. Cependant, cette différence entre les rendements obtenus n'était pas significative (analyse de variance avec  $p < 0,05$ ) entre les plants irrigués avec les eaux grises provenant des bacs inclinés et les plants irrigués avec les autres eaux d'irrigation. Par ailleurs, nous avons observé des valeurs de pH et de SAR des sols irrigués significativement supérieures ( $p < 0,05$ ) à celles du sol initial aux profondeurs susmentionnées. La conductivité électrique des sols irrigués a par contre baissé par rapport à celle du sol initial. Il ressort des analyses statistiques qu'une différence significative existe entre les sols des parcelles irriguées et le sol initial seulement à la profondeur 0-15 cm. L'irrigation a donc permis de manière globale d'améliorer le pH et la conductivité électrique du sol le rendant ainsi plus favorable aux cultures. Néanmoins, un meilleur traitement des eaux grises issues du système de traitement par bacs inclinés s'impose afin de réduire la concentration du sodium qui peut être nocive pour les cultures et le sol lorsqu'elle est élevée.

Mots clés : laitue, eaux grises, eaux barrage, eaux puits, irrigation, sols.

## ABSTRACT

Freshwater resources are generally reserved for humans use in priority because of their depletion and the pressures on them. In this situation, it is essential to research new sources of water for activities that consume large amounts of water such as agriculture. In this context, greywater seem to hold a good place in policies set up in order to reduce pressures on fresh water resources due to their low pollutant load and their availability. It is in the perspective of reusing treated greywater in agriculture over the long term that we have proposed to study the effects of this reuse on irrigated soils and plants. Lettuce plants (*Lactuca sativa L.*) of a local variety (Pierre Benite) were irrigated with two types of treated grey water, from a system called slanted soil settled pilot families in peri-urban and rural areas on the one hand and a high rate algal pond located on the campus of Kamboinsé in the other. Well water and dam water were used as control treatments. Cropping tests were conducted from March to May during the hot season and agronomic parameters (number of leaves, leaves yield) and soil physico-chemical characteristics were studied between 0-15 cm and 15-30 cm. The results showed that under the experimental conditions established, plants from plots irrigated with greywater from slanted soil growth and yield slightly decrease compared to that of plants from other treatments. However, this difference between yields was not significant ( $p < 0.05$ ) between plants irrigated with greywater from slanted soil and those irrigated with other treatments. Furthermore, we observed that the pH and the SAR of irrigated plots were significantly higher ( $p < 0.05$ ) than those of the initial soil at the two different depths. The electrical conductivity of irrigated plots has decreased compared to the one of the initial soil. It appears from the statistical analysis that a significant difference exists between soils of irrigated plots and the initial soil only for the depth of 0-15 cm. Irrigation allowed to improve the pH and electrical conductivity of the soil, making it more favorable to crops. However, a better treatment of grey water from slanted soil is necessary to reduce the concentration of sodium that can be harmful to crops and soil at high concentrations.

Keywords: lettuce, greywater, dam water, well water, irrigation, soil.

## SIGLES ET ABREVIATIONS

<i>E.coli</i>	: Escherichia coli
2IE	: Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ACP	: Analyse en Composantes Principales
Améli-EAUR	: Amélioration de l'Accès à l'Eau potable, à l'Assainissement en milieu Urbain et Rural
CE	: Conductivité électrique
DBO5	: Demande Biochimique en Oxygène
DCO	: Demande Chimique en Oxygène
E0	: Echantillon initial du sol prélevé avant culture
EB	: Eau de Barrage
EDTA	: Acide Ethylène Diamine Tétracétique
EGTFP	: Eau Grise Traitée issue des Familles Pilotes
EGTS	: Eau Grise Traitée provenant de la Station
EP	: Eau de Puits
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GEPPA	: Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée
JAR	: Jour Après Repiquage
LEDES	: Laboratoire Eau Dépollution Ecosystèmes et Santé
MAHRH	: Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques
MES	: Matières en suspension
NPK	: Azote, Phosphore, Potassium
Nt, Pt	: Azote total, Phosphore total
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PEHD	: PolyEthylène Haute Densité
pH	: Potentiel Hydrogène
ROSA	: Resource Oriented Sanitation concepts in peri-urban areas in Africa
SAR	: Sodium Adsorption Ratio
UFC	: Unité Format Colonie

## SOMMAIRE

DEDICACE -----	i
REMERCIEMENTS -----	ii
RESUME -----	iii
ABSTRACT -----	iv
SIGLES ET ABREVIATIONS -----	v
LISTE DES TABLEAUX -----	viii
INTRODUCTION -----	1
Contexte et problématique -----	1
Objectifs -----	2
Hypothèses -----	2
I-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE -----	3
I.    SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE -----	4
I.1.    Caractéristiques des eaux grises -----	4
I.2.    Réutilisation et impacts des eaux grises en agriculture -----	15
II-MATERIEL ET METHODES -----	19
II.    MATERIEL ET METHODES -----	20
II.1.    Présentation de la zone d'étude -----	20
II.2.    Prélèvement et analyse des eaux d'irrigation -----	21
II.3.    Choix et justification du type de culture -----	24
II.4.    Traitements et Design expérimental -----	24
II.5.    Analyse des paramètres physico-chimiques sol -----	26
II.6.    Analyse des paramètres agronomiques des plantes -----	28
II.7.    Traitement des données -----	28
III-RESULTATS ET DISCUSSION -----	29
III.    RESULTATS ET DISCUSSION -----	30
III.1.    Paramètres physico-chimiques des eaux d'irrigation -----	30
III.2.    Paramètres physico-chimiques du sol -----	31
III.3.    Paramètres agronomiques -----	37
CONCLUSION ET PERSPECTIVES -----	43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----	44
ANNEXES -----	ix

## LISTE DES FIGURES

Figure 2 : Coupe transversale d'un marécage artificiel (Morel & Diener 2006)-----	11
Figure 3 : Schéma d'un jardin vertical (Morel & Diener, 2006) -----	12
Figure 4 : Système de traitement des eaux grises par bacs inclinés-----	13
Figure 5: Chenal Algal à Haut Rendement (CAHR)-----	14
Figure 1 : Localisation du site expérimental-----	20
Figure 6 : Disposition de la laitue sur une parcelle-----	24
Figure 7 : Disposition des parcelles et traitements appliqués -----	25
Figure 8 : Disposition des parcelles sur le champ expérimental-----	26
Figure 9 : Points de prélèvement des échantillons de sol avant et après culture-----	27
Figure 10 : Variation du pH entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 0 et 15 cm -----	33
Figure 11 : Variation du pH entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 15 et 30 cm -----	33
Figure 12 : Variation de la conductivité électrique entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 0 et 15 cm -----	34
Figure 13 : Variation de la conductivité électrique entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise 15 et 30 cm -----	35
Figure 14 : Variation du SAR entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 0 et 15 cm -----	36
Figure 15 : Variation du SAR entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 15 et 30 cm -----	37
Figure 16 : Evolution du nombre de feuilles de la laitue durant le cycle cultural -----	38
Figure 17: Cercle des corrélations (a) Figure 18 : Graphique des individus (a)-----	39
Figure 19 : Graphique des individus (b) Figure 20 : Cercle des corrélations (b)-----	41
Figure 21 : Variation du rendement de feuilles sèches en fonction des traitements-----	42

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Recommandations pour la réutilisation des eaux grises en agriculture-----	17
Tableau II : Paramètres chimiques des eaux d'irrigation-----	31
Tableau III : Paramètres physico-chimiques du sol avant et après culture -----	32
Tableau IV : Valeurs propres (a)-----	38
Tableau V : Matrice de corrélation (a) -----	39
Tableau VI : Valeurs propres (b)-----	40
Tableau VII : Matrice de corrélation (b)-----	40

## INTRODUCTION

### Contexte et problématique

La raréfaction des ressources en eaux douces est un phénomène qui prend de l'ampleur et requiert une attention particulière. En effet, l'agriculture est à l'origine de 70% des prélèvements mondiaux en eau douce et plus de 90% de cette quantité prélevée est non renouvelable (FAO, 2012). Cette situation est aggravée d'une part par une croissance démographique importante dans les pays en voie de développement et d'autre part par les changements climatiques. Par ailleurs, les pratiques d'exploitation agricoles des terres ne favorisent pas la restitution adéquate des éléments nutritifs prélevés par les plantes dans un contexte de faible fertilité des sols. Enfin, la mauvaise pluviométrie et/ou la mauvaise gestion des ressources en eau conjuguées aux aspects évoqués ci-dessus entraînent une insécurité alimentaire de plus en plus prononcée, particulièrement en Afrique subsaharienne.

Face à cette situation la recherche de nouvelles sources d'eau et de fertilisants devient impérative. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet d'Amélioration de l'Accès à l'Eau potable, à l'Assainissement en milieu Urbain et Rural (Ameli-EAUR).

Ce projet a développé un système d'assainissement écologique de type autonome basé sur la collecte séparée des fèces, des urines et des eaux grises. Ce type d'assainissement est une approche intégrée qui empêche la pollution et permet la récupération ainsi que le recyclage des éléments nutritifs en agriculture (Haq & Cambridge, 2012). En effet, la réutilisation des eaux usées en général et celle des eaux grises en particulier permet de fournir une source supplémentaire d'eau pour différents usages. Elle permet ainsi de combler les déficits hydriques et de réduire la consommation d'eau potable de près de 50% tout en protégeant le milieu environnant (Ecosse, 2001). Cette réutilisation permet donc de réduire les pressions de plus en plus fortes sur les ressources en eau et de contribuer à lutter contre la pauvreté et la faim (OMS, 2006). Ainsi, pour les pays confrontés à ces déficits hydriques, la réutilisation des eaux usées est devenue une option durable de la gestion des ressources en eau. Par exemple, en Israël, plus de 70% des eaux usées traitées sont réutilisées pour l'irrigation agricole (Mekorot, 2007). En Jordanie, la mise en œuvre de systèmes de réutilisation des eaux grises a permis de réduire la demande en eau douce et la facture d'eau de 15% et 27% respectivement (Faruqui & Al Jayyousi., 2002). En outre, leur utilisation en agriculture est fortement encouragée à cause de leurs apports nutritifs et leur caractère protecteur de l'environnement (Bhausahab et al., 2010).

Toutefois, la connaissance des effets que pourrait avoir la réutilisation des eaux grises à long terme sur les sols et les plantes irriguées est indispensable. En effet, les eaux grises au-delà des éléments nutritifs qu'elles apportent, contiennent également des composants indésirables tels que les huiles, les graisses et les tensioactifs ou surfactants qui sur le long terme pourraient réduire la perméabilité des sols irrigués vis-à-vis de l'eau, avec des conséquences néfastes sur la productivité agricole et la durabilité de l'environnement (Shafran et al., 2005; Al-Hamaiedeh & Bino, 2010; Travis et al., 2010).

Le présent travail a donc été initié, en tenant compte des conclusions de ces études antérieures et des faibles informations sur les impacts potentiels des eaux grises traitées sur les sols et les plantes irriguées dans le contexte sahélien.

## **Objectifs**

L'objectif global de cette étude est de contribuer à la valorisation des différentes eaux grises traitées pour une agriculture durable à travers l'étude des effets des eaux grises traitées par deux systèmes différents sur une culture maraichère et le sol . Il s'agira plus spécifiquement pour l'atteinte de cet objectif de :

- Caractériser les eaux d'irrigation;
- Evaluer et comparer les effets des eaux d'irrigation sur les sols et les plantes irriguées ;
- Proposer des conditions de réutilisation adéquates des eaux grises traitées en agriculture dans le contexte sahélien.

## **Hypothèses**

- ✓ Les eaux grises traitées pourraient être conformes aux normes de réutilisation en agriculture ;
- ✓ Les eaux grises traitées pourraient améliorer la croissance et le rendement des plantes ;
- ✓ L'utilisation des eaux grises traitées en agriculture pourrait affecter les propriétés physico-chimiques du sol.

Le présent document comprend trois grandes parties. Une première partie est consacrée à la synthèse bibliographique sur les principaux composants de l'étude. Une seconde partie est dédiée à la description du matériel et des méthodes utilisés pour la réalisation de cette étude. Une troisième partie enfin, est destinée à la présentation des résultats obtenus suivis de la discussion. Une conclusion intégrant les recommandations et les perspectives clôt ce document.

# I-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

## **I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **I.1. Caractéristiques des eaux grises**

#### **I.1.1. Définitions**

Les eaux usées peuvent être définies comme étant des déchets liquides évacués des habitations, des locaux commerciaux et de sources similaires, vers les réseaux d'élimination individuels ou les canalisations d'égout municipales et contenant principalement des excréta humains et de l'eau ayant servi. Lorsqu'elles sont produites essentiellement par des activités ménagères ou commerciales, elles sont appelées eaux usées domestiques ou municipales. Dans ce contexte, les eaux usées domestiques ne contiennent pas d'effluents industriels en des quantités qui puissent menacer le fonctionnement du réseau d'égouts, l'installation de traitement, la santé publique ou l'environnement (OMS, 2012a). Les eaux usées comprennent les eaux grises et les eaux vannes.

Les eaux vannes sont les eaux usées provenant des toilettes, séparées à la source, contenant des fèces, de l'urine et de l'eau de chasse ainsi qu'éventuellement, de l'eau utilisée pour la toilette anale (OMS, 2012b).

Le terme eaux grises est utilisé pour désigner toutes les eaux usées produites dans un ménage hormis les eaux usées provenant des toilettes (Morel & Diener, 2006 ; Travis et al., 2010). Ce sont donc les eaux usées provenant des activités domestiques telles que la cuisine, les bains et/ou la lessive (Al-Hamaideh & Bino, 2010), ne contenant en général pas d'excréta en concentrations notables (OMS, 2012a). Ces eaux sont également qualifiées d'eaux ménagères dans certains documents.

#### **I.1.2. Sources, quantités et gestion**

Les eaux grises étant le reflet des activités du ménage, leurs principales caractéristiques dépendent fortement de facteurs tels que les habitudes culturelles, le niveau de vie et la taille du ménage. Ainsi les quantités d'eaux grises produites varient en fonction des dynamiques du ménage et sont influencées par l'existence de sources d'approvisionnement en eau (Morel & Diener, 2006). En général, elles représentent respectivement en milieu rural et urbain 64 % et 70% (Lina et al., 2008).

En outre, des études menées précédemment en zones rurales (Barkoundouba et Kolongodiessé Ziniaré) et péri urbaine (Kamboinsé, Ouagadougou) au Burkina Faso ont montré que les eaux grises des ménages proviennent principalement de la douche, de la lessive, de la vaisselle et

des ablutions dans quelques cas. En effet, selon une étude menée par Sangare (2011) à Barkoundouba, sur les quantités totales d'eaux grises produites 56% proviennent de la douche, 17% de la vaisselle, 15% de la lessive et 12% des ablutions. Les quantités d'eaux grises produites chaque jour dans les ménages varient en moyenne entre 70 et 147 L pour une moyenne hebdomadaire variant entre 491 et 1027 L. Il ressort également de cette étude que 60% des habitants déversent les eaux grises qu'ils produisent à l'intérieur de leur cours et que les 40% restants éliminent leurs eaux grises en les déversant dans des latrines. Une autre étude menée par Adoum (2011) à Kamboinsé indique que la production hebdomadaire d'eaux grises des ménages varie en moyenne de 350 à 780 L ; soit une production moyenne journalière variant de 50 à 112 L environ. En ce qui concerne la gestion des eaux grises, cette étude a montré que 74% des eaux grises sont rejetées dans la rue, 22% dans les cours et 4 % à l'intérieur des douches. Par ailleurs, Lina et al. (2008) ont montré en Jordanie, que la douche contribue entre 22 et 36%, la lessive entre 17 et 28%, les lavabos entre 11 et 47% des eaux grises produites. Les sources majeures de production d'eaux grises dans les milieux urbains sont les eaux grises provenant des douches et des lavabos tandis que dans les milieux ruraux ce sont les eaux en provenance des cuisines et de la lessive qui contribuent le plus à la production des eaux grises (Lina et al., 2008). Selon une étude menée par le projet ROSA (2009), les quantités d'eaux grises produites dans les ménages des zones péri urbaines au Kenya varient entre 57 et 72 L par jour. Il ressort également de cette étude que les eaux grises ainsi produites sont pour la majeure partie déversées dans la nature (66,9%), dans des fosses septiques ou les latrines (29%) ou encore utilisées pour le nettoyage des latrines. Toujours en Afrique orientale, précisément en zone péri urbaine en Ouganda, les quantités d'eaux grises générées par jour par les ménages sont approximativement de 48 à 64 L (ROSA, 2009). Concernant la gestion de ces eaux, 68% de la population les déversent à même le sol, 21% dans les réseaux d'égout ou dans des trous d'infiltration, et enfin 11% les rejettent dans les jardins. Par ailleurs, la quantité d'eaux grises produites au Portugal est de 95,7 L par personne par jour dont 33% de ces eaux proviennent de la douche, 30% de la cuisine, 9% des lavabos, 7% des machines à laver et 5% des lave-vaisselle (Matos et al., 2012). Selon Friedler (2004) en Israël, le volume d'eaux grises produites par jour et par personne est de 98 L dont 30 L proviennent de la cuisine, 55 L de la douche et 13 L de la lessive.

### **I.1.3. Paramètres de qualité**

La connaissance de la qualité des eaux grises est importante car elle permet de choisir le type de traitement à appliquer et surtout leur aptitude à être réutilisées sur le long terme en

agriculture. Ainsi la qualité des eaux grises est généralement déterminée à travers un certain nombre de paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Ce sont entre autres :

🖨 Le pH qui indique le degré d'acidité ou d'alcalinité d'un liquide (OMS, 2012b) et est dérivé du nombre d'ions hydrogène en présence. Les valeurs du pH des eaux grises dépendent fortement de celles des sources d'eau d'approvisionnement et des activités effectuées dans le ménage (Morel & Diener, 2006). Ainsi, les eaux grises provenant de la lessive sont alcalines et ont généralement des valeurs de pH dans la plage 8-10 (Eriksson et al., 2002) ou 9,3-10 (Christova Boal et al., 1996) tandis que celles d'autres types d'eaux grises sont légèrement inférieures (5 à 8). Le pH du sol affecte considérablement la disponibilité de certains nutriments du sol tels que le phosphore, le cuivre, le fer, le zinc nécessaires pour la croissance de la plante et une valeur du pH comprise entre 6 et 7,5 est généralement considérée comme optimale pour la croissance de plusieurs plantes et la santé microbienne du sol (Pinto et al., 2009).

🖨 La température des eaux grises est plus élevée que celle de l'eau d'approvisionnement et varie entre 18 et 30°C. Ces températures relativement élevées sont attribuées à l'utilisation de l'eau chaude pour l'hygiène corporelle et la cuisine (Morel & Diener, 2006).

🖨 La conductivité électrique permet de déterminer la salinité des sels dissous présent dans les eaux grises. La conductivité électrique des eaux grises se situe entre 300 et 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mais des valeurs élevées de 2700 et 4500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ont été trouvées respectivement en Palestine (Burnat & Mahmoud, 2005) et en Jordanie (Li et al., 2008). Par contre, les eaux grises issues des ablutions ont une conductivité faible qui avoisine les 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Ahmed et al., 2008).

🖨 Les matières en suspension (MES) qui désignent la quantité de solides insolubles en suspension et flottant dans les eaux usées. Les concentrations les plus importantes de MES sont rencontrées dans les eaux grises de cuisine et de lessive (Morel & Diener, 2006). La concentration de MES dans les eaux grises varie de 50 à 300 mg/L mais peut atteindre des valeurs de 1500 mg/L dans des cas isolés (Del Porto & Steinfeld, 1999). Halalsheh et al. (2008) a observé une moyenne de 845 mg/L en Jordanie.

🖨 La Demande Biologique en Oxygène (DBO) et la Demande Chimique en Oxygène (DCO). Ces paramètres permettent d'évaluer la pollution organique d'une eau. La DCO est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toutes la matière organique d'une eau à l'aide d'un oxydant puissant. La  $\text{DBO}_5$ , elle mesure la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes pour dégrader les substances organiques biodégradables dans un échantillon

d'eau pendant 5 jours à 20°C (Morel & Diener, 2006). En Palestine la DBO atteint en moyenne 590 mg/L et dépasse 2000 mg/L dans des cas isolés (Burnat & Mahmoud, 2005). En Jordanie elle varie entre 977 et 1134 mg/L (Halalsheh et al., 2008) et est de 314 mg/L à Amman (Lina et al., 2008). En ce qui concerne la DCO des valeurs comprises entre 2257 et 2878 mg/L ont été rapportées par Halalsheh et al. (2008) qui attribue la production d'eaux grises concentrées dans les zones rurales de la Jordanie à la faible consommation d'eau douce. Lina et al. (2008) ont observé une DCO de 870 mg/L à Amman. Le rapport DCO/DBO5 est un bon indicateur de la biodégradabilité des eaux grises. Un ratio DCO/DBO5 inférieur à 2 ou 2,5 indique que les eaux usées sont facilement biodégradables (Morel & Diener, 2006). L'azote et le phosphore sont des éléments importants car ils jouent le rôle de fertilisant pour la croissance des plantes. Cependant, ils peuvent avoir des effets négatifs sur l'environnement ; les concentrations élevées de phosphore en particulier peuvent conduire à un développement algal accru dans le milieu récepteur. Dans les régions où les détergents ne contenant pas du phosphore sont utilisés, les concentrations de phosphore varient entre 4 et 14 mg/l (Eriksson et al., 2002) . Cependant, dans les régions où les détergents contenant du phosphore sont utilisés les concentrations moyennes de phosphore peuvent varier de 45 à 280 mg/L comme observées en Israël (Friedler, 2004).

Les valeurs d'azote trouvées dans les eaux grises des ménages varient généralement entre 5 et 50 mg/L (Morel & Diener, 2006). En effet, une concentration d'azote total de 9,2 a été trouvée en Jordanie (Lina et al., 2008) et des concentrations comprises entre 25 et 45 mg/L ont été mentionnées en Israël par Gross et al. (2006).

 Les cations majeurs échangeables (calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) et potassium ( $\text{K}^+$ ) sont tous des éléments essentiels pour la plante à l'exception du sodium qui joue néanmoins un rôle important dans les propriétés physiques du sol (Walworth, 2006). En effet, l'excès de sodium dans les eaux grises est la cause la plus probable de la réduction de la perméabilité du sol vis-à-vis de l'eau (Misra & Sivongxay, 2009). Des concentrations de 46 mg/L, 145 mg/L, 20 mg/L et 8 mg/L ont été respectivement observées pour le calcium, le sodium, le magnésium et le potassium en Jordanie par Lina et al. (2008). Finley et al. (2009) ont trouvé au terme de leur étude menée au Canada des valeurs allant de 2,2 à 2,5 mg/L pour le potassium, de 30 à 44 mg/L pour le calcium, de 20 à 27 mg/L pour le sodium et de 8,0 à 9,9 mg/L pour le magnésium.

 Le SAR (Sodium Adsorption Ratio) mesure la proportion relative d'ions sodium dans un échantillon d'eau à celles de calcium et de magnésium et est utilisé comme indicateur de

l'effet du sodium dans l'eau sur le sol et les plantes (Morel & Diener, 2006). Il est calculé à partir des concentrations de sodium, de calcium et de magnésium et permet de prédire le potentiel du sodium à affecter négativement le sol (Tavis et al., 2010). Les valeurs du SAR des eaux grises sont comprises entre 2 et 10 en fonction des détergents utilisés pour la lessive (Gross et al., 2005).

 Les pathogènes qui sont des microorganismes (bactéries, helminthes, protozoaires ou virus etc.) à l'origine d'une maladie. Les principaux dangers liés aux eaux ménagères proviennent de contaminations fécales croisées. La contamination fécale est donc limitée et provient d'activités telles que le lavage de linge contaminé par des fèces (couches), la toilette anale ou la douche. La contamination fécale est couramment mesurée au moyen d'organismes indicateurs communs tels que les coliformes ou les entérocoques. Toutefois, les eaux grises peuvent contenir de grandes quantités de composés organiques facilement dégradables, ce qui favorise la croissance des indicateurs fécaux. (OMS, 2012b). En effet, selon une étude menée par Kotut et al. (2011) au Kenya, les eaux grises produites sont probablement contaminées par des bactéries pathogènes (*Salmonella*, *Shigella*, *Vibrio Cholerae*) et doivent donc au préalable être désinfectées avant réutilisation. Il ressort également de cette étude que le nombre de coliformes totaux dans les eaux grises des ménages varie de  $1,3 \times 10^6$  à  $7,6 \times 10^6$  UFC/100 mL avec une moyenne de  $4,34 \times 10^5$  UFC/100 mL. Le nombre de coliformes fécaux (thermo tolérants) quant à lui était compris entre  $3,0 \times 10^3$  et  $7,4 \times 10^5$  UFC/100 mL avec une moyenne de  $2,51 \times 10^5$  UFC/100 mL.

 Les détergents et les surfactants qui sont un groupe de produits chimiques désignés comme ayant des propriétés de nettoyage ou de solubilisation qui consistent généralement à un groupe de tête polaire (chargé ou non) qui est bien solutionné dans l'eau et une queue hydrocarbonée non polaire qui n'est pas facilement solutionnée dans l'eau. Il en existe principalement trois types : anionique, non ionique et cationique. Les surfactants commerciaux communément utilisés sont les linear alkylbenzene sulphonates (LAS), les alkyl ethoxy sulphates (AES), les alkyl sulphates (AS), les alkylphenol ethoxylates (APE), les alkyl ethoxylates (AE) et les composés d'ammonium quaternaire (QAC) (Guang-Guo Ying, 2005). L'accumulation de surfactants dans le sol due à l'irrigation avec les eaux grises peut créer des sols hydrophobes ayant ainsi un effet significatif sur la productivité agricole et la durabilité de l'environnement (Shafran et al., 2005). L'utilisation d'eaux grises fortement concentrées en détergents pourrait inhiber la croissance de la plante et accélérer la salinité du sol (Sawadogo et al., 2013). Des études menées par Friedler (2004) ; Gross et al. (2005) et Shafran et al.

(2005) ont montré que les concentrations de surfactants dans les eaux grises varient entre 1 et 60 mg/L et sont en moyenne comprises entre 17 et 40 mg/L.

 Les huiles et les graisses constituent un groupe de substances insolubles dans l'eau telles que les graisses et la cire pouvant être supprimées par écumage naturel (Morel & Diener, 2006). Selon Travis et al. (2008), ces substances présentes dans les eaux grises utilisées pour l'irrigation pourraient s'accumuler dans le sol et conduire à une réduction significative de la capacité du sol à transmettre de l'eau. Al-Jayyousi (2003) a rapporté des valeurs atteignant 230 mg/L dans des eaux grises en Jordanie.

 Le bore et les chlorures sont essentiels aux plantes à faible concentration, mais peuvent être toxiques pour cultures sensibles à des concentrations élevées. Le bore provient principalement des détergents et sa concentration dans les eaux grises domestiques en Israël est comprise entre 1,4 et 1,7 mg/L (Gross et al., 2006). Cependant, des concentrations de bore atteignant 3 mg/L y ont été observées dans des eaux grises de lessive (Gross et al., 2005). Lina et al. (2008), ont trouvé une concentration de 192 mg/L pour les chlorures dans la capitale Jordanienne, Amman.

#### **I.1.4. Systèmes de traitement des eaux grises**

Les eaux grises sont généralement traitées avant réutilisation ou rejet dans la nature afin de protéger les individus qui pourraient entrer en contact avec ces eaux et l'environnement. Les étapes du traitement sont fonction de la qualité de l'effluent. Cependant, selon Morel & Diener (2006) à l'échelle d'un ménage (surtout dans les zones à faible revenu) le respect de deux (02) étapes principales est souvent suffisant ; ce sont le traitement primaire et le traitement secondaire. Le traitement primaire permet d'éliminer les éléments grossiers, les particules décantables, les huiles et graisses afin d'éviter le colmatage des composants du dispositif de traitement. Le traitement secondaire quant à lui permet l'élimination des pathogènes, de la matière organique dissoute et des nutriments dans les eaux grises. Selon Lina et al. (2008), les technologies utilisées pour le traitement des eaux grises peuvent être également classifiées en fonction du principe de traitement considéré qui peut être physique, biologique, chimique ou une combinaison de ces principes. Morel & Diener (2006) préconise un contrôle de la pollution à la source pour la mise en œuvre d'un système de gestion des eaux grises durable sur le plan environnemental et économique.

Plusieurs systèmes de traitement des eaux grises existent allant de systèmes simples aux systèmes sophistiqués. Dans les pays à moyens et faibles revenus, l'installation de systèmes simples peut être une solution durable. Cependant, les principales raisons liées à l'échec des

systèmes sont le manque de maintenance et de compréhension des principes opérationnels de la chaîne de traitement (Morel & Diener, 2006). En somme, il faut retenir que le choix de la technologie la plus appropriée est tributaire de nombreux facteurs tels que les caractéristiques des eaux grises, l'échelle de fonctionnement, l'utilisation finale de l'eau, les facteurs socio-économiques relatifs au coût de l'eau, les coutumes ainsi que les risques sanitaires (Jefferson et al., 2004; Eklund & Tegelberg, 2010). Ainsi, plusieurs systèmes de traitement et de réutilisation des eaux grises à petite échelle ont été testés ou étudiés dans différentes parties du monde.

Morel & diener (2006) ont fait une synthèse des systèmes de gestion des eaux grises mis en place dans différents pays à revenu moyen et faible à travers le monde. En outre, ces auteurs ont présenté une large gamme de systèmes allant de la simple infiltration à des systèmes sophistiqués basés sur l'anaérobie/aérobie combiné à des filtres. Un aperçu de ces systèmes est signalé ci-dessous.

#### **I.1.4.2. Filtres plantés à écoulement horizontal ou marécages artificiels**

Les filtres plantés à écoulement horizontal sont constitués d'une couche de matériaux imperméable (argile solidement empaqueté, plastique ou béton) sur laquelle repose du sable ou du gravier. Une quantité de sol (5 à 10 cm) est appliquée à la surface du massif filtrant pour faciliter le développement des plantes émergentes. Les eaux grises sont injectées dans le filtre à partir d'une zone d'entrée dépourvue de végétation et s'écoulent horizontalement à travers le filtre. Le niveau de l'eau est maintenu en dessous de la surface du filtre et est contrôlé par un coude situé généralement à la sortie entre 10 et 15 cm de la surface du filtre. En surface, le niveau est tenu horizontal afin d'éviter l'érosion, le fond du système de préférence à une pente de 0,5-1% de l'entrée à la sortie, qui facilite la circulation de l'eau. La taille des grains doit permettre la circulation des eaux grises sans colmatage mais ne doit pas être trop importante afin de permettre un traitement efficient (Morel & Diener, 2006)

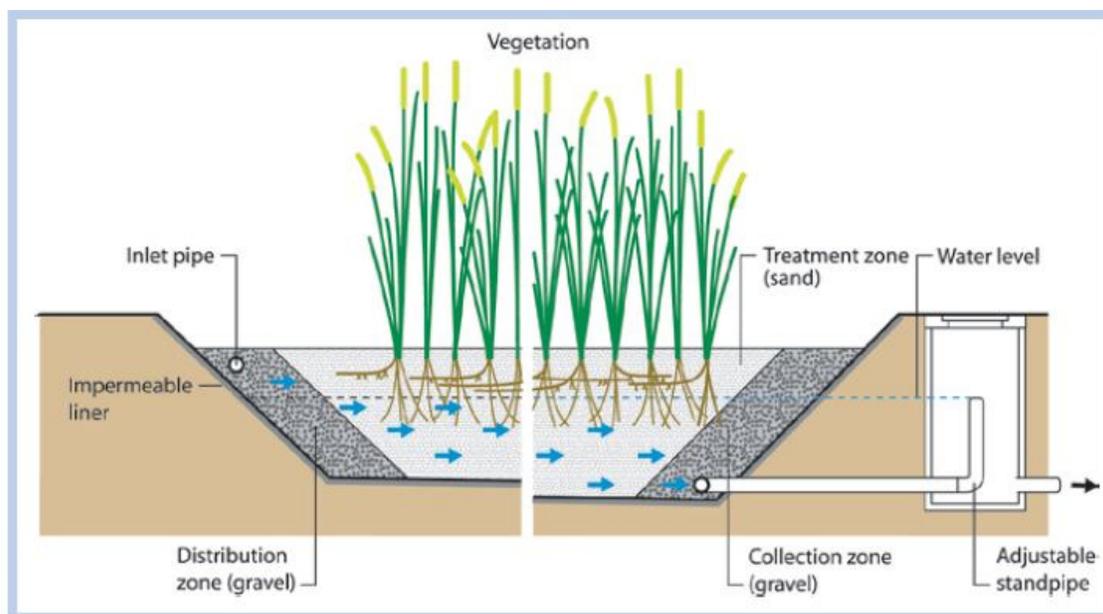


Figure 1 : Coupe transversale d'un marécage artificiel (Morel & Diener 2006)

#### I.1.4.2. Jardin vertical

Le jardin vertical est un moyen familier utilisant les eaux grises pour jardiner dans les pays à faibles revenus qui a été mis en œuvre au Kenya, en Ethiopie et en Afrique du Sud. La construction d'un jardin vertical est faite sur une couche de fond creusée dans le sol. Des piquets de bois (2 m de haut) sont ensuite solidement fixés dans la couche de fond. Un tissu d'ombrage est attaché suivant les piquets de manière à obtenir un cylindre qui sera rempli d'une mixture composée de 3 parts de sol, de deux parts de fumier et d'une part de cendre. Un noyau central en pierre est construit afin d'éviter un écoulement rapide de l'eau à travers la colonne. Les eaux grises provenant de la douche et de la lessive sont ensuite appliquées quotidiennement (3 L en moyenne) sur les jardins. Après la fin de semaine environ 10 L d'eau douce est appliquée sur le jardin pour enlever le savon. Des légumes tels que les tomates et les oignons ont été plantés sur le jardin (ROSA, 2009).

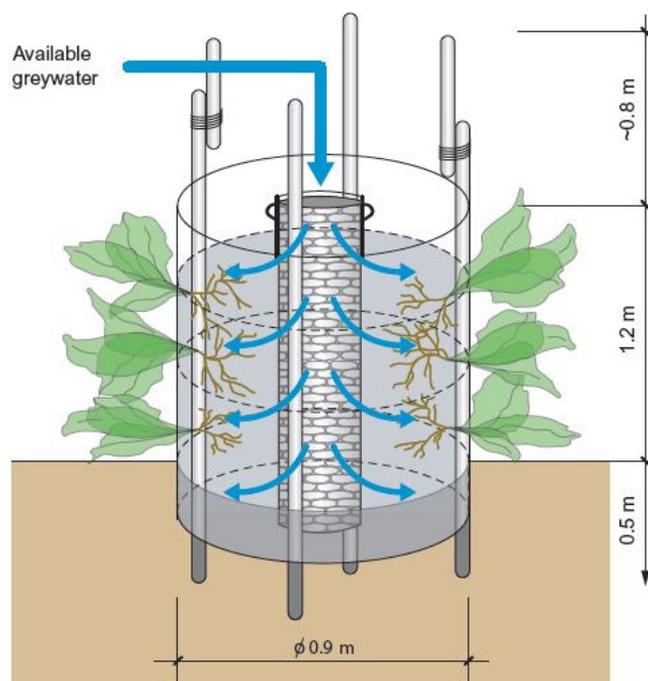


Figure 2 : Schéma d'un jardin vertical (Morel & Diener, 2006)

#### I.1.4.3. Bacs inclinés

Chaque dispositif de traitement est composé de trois (03) composantes principales à savoir le filtre à écoulement vertical, le filtre à écoulement horizontal et le réservoir de stockage des eaux grises traitées

Le filtre à écoulement vertical est un fût en polyéthylène de 60 L qui permet la collecte des eaux de lessive et de vaisselle. Il contient 30 cm de matériau granitique de filtration et est couvert par un filet d'ouverture de mailles 10 mm permettant de retenir les matières solides de taille moyenne provenant des eaux de vaisselle et de lessive, afin d'éviter ainsi le colmatage rapide du massif filtrant.

Le filtre à écoulement horizontal est composé de deux (02) bacs dont le premier (bac supérieur en plastique) mesure 1 m de long et permet de recueillir les eaux provenant directement de la douche ainsi que les eaux de lessive et de vaisselle ayant subi un prétraitement (filtration verticale). Ce bac repose sur le deuxième (bac inférieur), construit en ciment et mesurant 2 m de longueur pour 20 cm de largeur interne qui permet de poursuivre la filtration horizontale des eaux grises avant stockage. Pour faciliter l'écoulement des eaux, les bacs sont inclinés d'une pente de 5%. Les bacs contiennent chacun du granit à une hauteur de 10 cm qui joue le rôle de matériau de filtration.

Le réservoir de stockage des eaux grises traitées est un fût en polyéthylène de 200 L muni d'un couvercle et enfoui dans le sol.

La granulométrie du matériau granitique de filtration utilisé est de 1-9 mm pour le fût de collecte, de 1-6 mm pour le bac supérieur, et de 1-4 mm pour le bac inférieur.

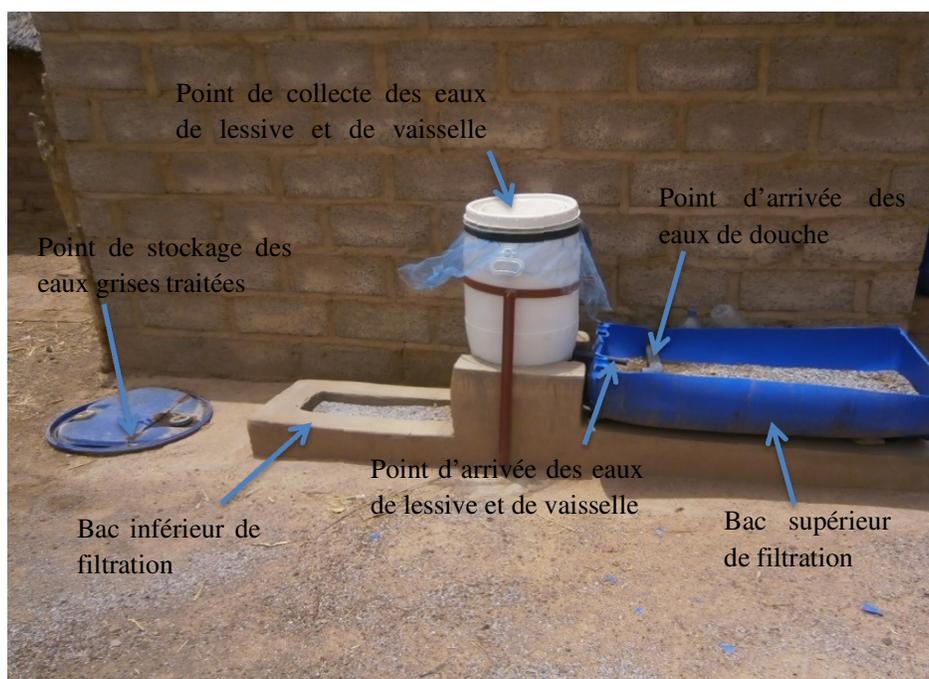


Figure 3 : Système de traitement des eaux grises par bacs inclinés

#### I.1.4.4. Etang algal à haut rendement

La station expérimentale de traitement des eaux grises par Chenal Algal à Haut Rendement (CAHR) comporte 3 unités principales. La bêche de relevage et le bassin décanteur-digesteur constituent la première unité. La lagune du chenal constitue la seconde unité, le bassin de décantation la troisième. Un trop plein connecté à un puits perdu est prévu au niveau de chaque bassin. Le temps de séjour des eaux dans le chenal est de dix (10) jours.

Les eaux grises recueillies au niveau de la cité universitaire arrivent de façon gravitaire dans la bêche de relevage sans prétraitement préalable. C'est un bassin de forme carré large de 2,24 m de côté et ayant une profondeur de 1,2 m. A partir de la bêche de relevage, l'eau est pompée dans un bassin décanteur-digesteur qui a une forme conique et est large de 2,24 m. Il est compartimenté en deux bassins inter connectés dont le premier est profond de 1m et le second de 2,97 m. Ce bassin reçoit d'une part l'eau pompée de la bêche de relevage et d'autre part, l'excès de la biomasse algale (boue) récirculée à partir du chenal par pompage.

Le CAHR est alimenté de façon gravitaire à partir du décanteur-digester. Les eaux y sont maintenues en mouvement par un mixeur électromécanique. C'est une lagune de forme crousselle de 17,16 m de long et de 8 m de large muni d'un chenal de 0,9 m de rayon à chaque extrémité. C'est à l'intérieur de cette lagune qu'aura lieu la plus grande partie des mécanismes d'épuration de l'eau. L'excès de la biomasse algale produite dans le CAHR est recirculé vers le décanteur-digester afin d'optimiser les rendements et de favoriser une élimination de l'excès d'algues qui pourrait perturber la symbiose algo-bactérie.

L'eau passe ensuite de façon gravitaire dans le bassin de décantation. Ce bassin est de forme conique avec un diamètre de 1 m pour une profondeur totale de 2,45 m. A ce niveau, il y a une décantation des boues et l'eau traitée coule de façon gravitaire vers un bassin collecteur de forme carré et mesurant 1,04 m de large et 1,15 m de profondeur. A partir de ce bassin, l'eau traitée est pompée vers un polytank (fût) en vue de sa réutilisation en agriculture.



Figure 4: Chenal Algal à Haut Rendement (CAHR)

## I.2. Réutilisation et impacts des eaux grises en agriculture

Dans les régions où la rareté des ressources en eau douce est un problème persistant, la réutilisation des eaux usées en agriculture a vu le jour pour pallier le déficit hydrique. En effet, l'agriculture est une activité consommatrice de grandes quantités d'eau et pour satisfaire ce besoin, les eaux usées ont été utilisées comme eaux d'irrigation mais également comme source de nutriments car contenant des éléments nécessaires à la croissance des plantes. Cependant, le respect des directives de réutilisation des eaux usées en agriculture requiert l'utilisation de systèmes de traitement efficaces et fiables. La réutilisation des eaux usées en agriculture reste donc une activité de grande envergure nécessitant des investissements technologiques importants très souvent négligés des gouvernements. En vue de promouvoir la réutilisation des eaux usées à petite échelle, la séparation des eaux usées à la source a récemment été perçue comme étant une possible stratégie pour le traitement et la réutilisation simplifiée et décentralisée des eaux usées (Lopez et al., 2002). Ce modèle est basé sur la théorie qui part du fait qu'exclure les déchets solides humains du flux de déchets pourrait significativement améliorer le processus de traitement des eaux usées. De cette recherche a émergé les termes eaux noires ou eaux vannes et eaux grises ou eaux ménagères (Finley, 2008). Les eaux grises peuvent faire l'objet d'utilisations diverses.

Ainsi, la réutilisation externe ou hors site des eaux grises traitées fait référence à l'irrigation des cultures, au développement et/ou à la préservation des marécages et la recharge des aquifères. En ce qui concerne la réutilisation en interne ou sur site, l'eau est retenue dans un processus local de boucle. L'utilisation interne peut également être classifiée en réutilisation en plein air ou en intérieur. La réutilisation en plein air concerne par exemple l'irrigation des espaces verts des campus, des terrains de sport, des cimetières, des parcs et parcours de golf, des jardins privés et pour le nettoyage des véhicules et des fenêtres, pour la protection contre le feu, l'alimentation en eau des chaudières et la production de béton. En interne les eaux peuvent être utilisées par exemple pour la chasse des toilettes, le lavage des vêtements et le bain. (Lina et al., 2008).

### Eaux grises brutes

Selon Travis et al. (2010), l'irrigation avec les eaux grises brutes conduit au développement de sols hydrophobes et à l'accroissement du SAR dans certains sols et pourrait conduire sur le long terme à des effets négatifs plus prononcés sur l'infiltration de l'eau dans le sol. En effet au terme de leur étude, il ressort que l'utilisation des eaux grises brutes pour l'irrigation sur

trois types de sols différents a montré la présence significative de surfactant, d'huile, de graisse, et de coliformes dans le sol comparativement à l'utilisation d'eaux grises traitées ou d'eau douce.

En Ouganda, l'utilisation des eaux grises brutes pour alimenter des jardins verticaux a montré que l'effet de l'application des eaux grises sur les caractéristiques du sol n'était pas significatif par rapport au potassium, à la matière organique et à la teneur en azote. Cependant il y avait une légère diminution de la teneur en phosphore. Les plants de tomates et d'oignons cultivés dans les jardins verticaux ont prospéré avec les eaux grises mais ont été attaqués par des parasites (ROSA, 2009).

### Eaux grises traitées

Les eaux grises traitées peuvent être réutilisées pour l'irrigation sans effets préjudiciables sur le sol ou sur la croissance de la plante (Travis et al., 2010). En effet, Al-Jayyousi (2003) a présenté la pratique de réutilisation des eaux grises et discuté de la réutilisation des eaux de cuisine et de lavabo après y avoir retiré la graisse pour le jardinage dans la ville rurale d'Al-Tafilah en Jordanie.

Finley et al. (2009) ont trouvé qu'en terme de poids sec de culture (carotte, laitue, poivron) par bloc expérimental, aucune différence significative n'a été observée entre les blocs irrigués avec des eaux grises et les blocs recevant l'eau du robinet. Ils ont expliqué ce résultat par la faible teneur en éléments nutritifs des eaux grises. Ils ont également mentionné le fait que toutes les plantes ont bien poussé et produit des fruits sains, sauf un seul bloc contrôle de laitue souffrant de faiblesse liés aux ravageurs.

#### **I.2.1. Recommandations pour la réutilisation des eaux grises**

Le non-respect de ces recommandations pour la réutilisation des eaux grises en agriculture peut avoir des impacts négatifs tant sur les hommes que sur l'environnement.

Tableau I : Recommandations pour la réutilisation des eaux grises en agriculture

Paramètres	Unités	Recommandations	Références
pH	-	6,5-8,5	OMS (2006)
Conductivité électrique CE	µS/cm	< 3000	OMS (2006)
Azote total Nt	mg/L	20-85	OMS (2006)
Calcium Ca <sup>2+</sup>	mg/L	< 200	Khodapanah et al., (2009)
Magnésium Mg <sup>2+</sup>	mg/L	< 200	Khodapanah et al., (2009)
Phosphore Pt	mg/L	6-20	OMS (2006)
Sodium Na <sup>+</sup>	mg/L	< 100	OMS (2006)
Chlorures Cl <sup>-</sup>	mg/L	< 350	OMS (2006)
SAR	-	3-9	OMS (2006)
Surfactants	mg/L	8	Hijikata et al., (2011)
Détergents	g/L	< 1	Sawadogo et al., (2013)
E. coli	UFC/100mL	< 10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>	OMS (2006)
Coliformes fécaux	UFC/100mL	< 10 <sup>4</sup>	Blumenthal et al., (2000)

### I.2.2. Impacts sanitaires et environnementaux des eaux grises

L'utilisation des eaux grises, en particulier, peut conduire à des risques secondaires provenant de la création de zones favorisant la prolifération d'insectes vecteurs de maladies (mouches, moustiques) et donc la transmission de ces maladies (OMS, 2012b). De plus, les eaux grises peuvent contenir des concentrations considérables de composés organiques facilement dégradables, qui favorisent le développement d'indicateurs fécaux. La combinaison de tous ces facteurs conduit à la propagation des maladies hydriques causes de mortalité. Parmi les groupes vulnérables aux risques découlant des activités agricoles utilisant des eaux grises trois groupes différents sont principalement exposés. Il s'agit des travailleurs agricoles, des communautés à proximité des exploitations agricoles et des consommateurs des produits agricoles (OMS, 2012a).

Dans les zones urbaines et péri-urbaines des pays à faibles revenus, les eaux grises sont le plus souvent déversées sans traitement dans les caniveaux ou les égouts d'où elles s'écoulent majoritairement pour polluer les systèmes aquatiques. Cela contribue à la réduction de l'oxygène, à l'accroissement de la turbidité, à l'eutrophisation, et à la contamination microbienne et chimique des systèmes aquatiques (Morel & Diener, 2006).

Les effets liés à la salinité sont préoccupants dans les régions arides et semi-arides, où les sels accumulés ne sont pas évacués régulièrement du profil du sol par la pluie. L'utilisation d'eaux ménagères ayant de fortes teneurs en sel peut accélérer le processus de salinisation des sols affectant ainsi la productivité de ces derniers à travers la destruction de la structure du sol, la modification de la pression osmotique dans la zone des racines ou encore en provoquant la toxicité d'ions spécifiques tels que le sodium, le bore et les chlorures (OMS, 2012b). En effet, les brûlures des feuilles des plants lors de la croissance foliaire est un symptôme typique indiquant de fortes concentrations de chlorures (Morel & Diener, 2006).

## II-MATERIEL ET METHODES

## II. MATERIEL ET METHODES

### II.1. Présentation de la zone d'étude

L'étude a été conduite à Kamboinsé, localité située à environ 15 km au nord de la commune de Ouagadougou sur l'axe Ouagadougou - Kongoussi. Kamboinsé fait partie de l'arrondissement n°9 de la commune de Ouagadougou et est constitué de quatre (04) secteurs (37, 38, 39, 40) (Annuaire statistique, 2010).

La production des cultures a été faite à Kamboinsé sur le site expérimental de culture de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Ce site est situé à proximité de la station de traitement des eaux grises du campus dudit site.

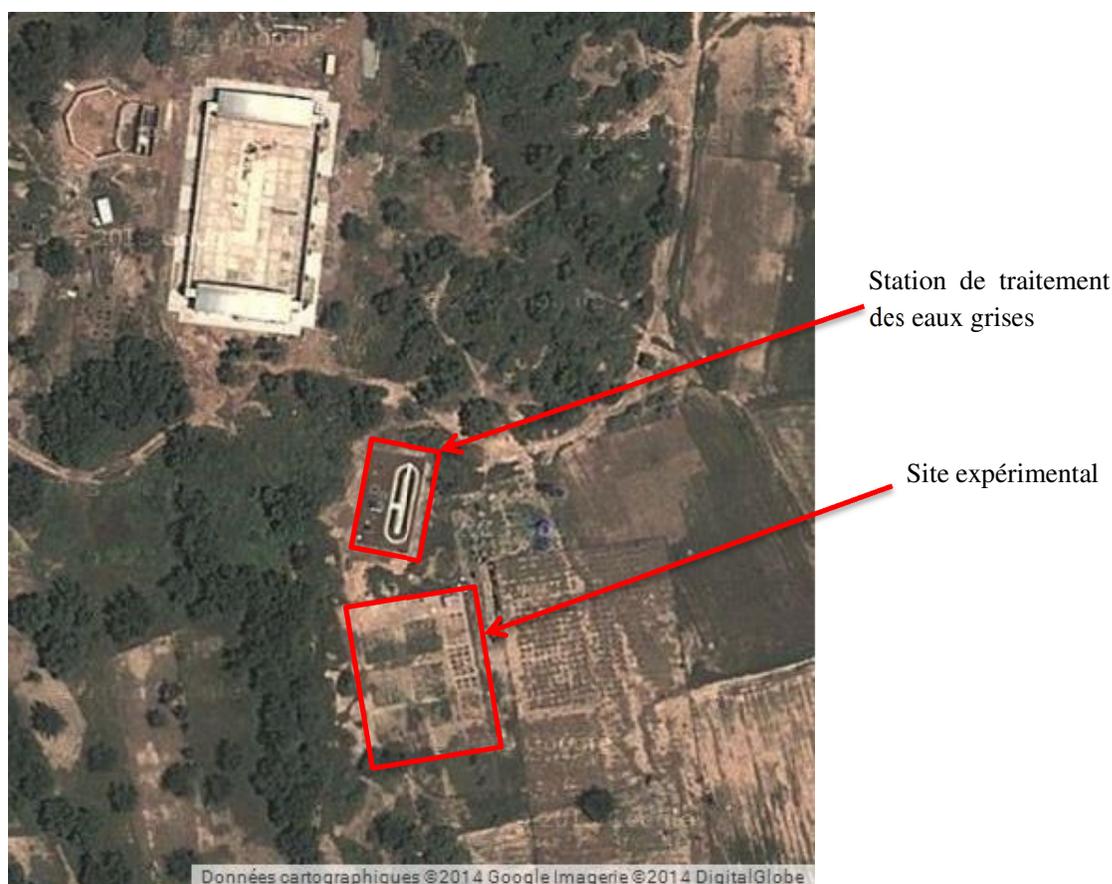


Figure 5 : Localisation du site expérimental

#### II.1.1. Climat et pluviométrie

Situé dans la zone soudano-sahélienne, le village de Kamboinsé se caractérise par un climat tropical avec deux saisons principales. La saison pluvieuse s'étend de juin à septembre, et est marquée par des vents humides de la mousson. Les hauteurs d'eau sont rarement supérieures à

800 mm par an. Les mois de juillet et d'août enregistrent les plus grandes quantités de pluies. La saison sèche, la plus longue, va d'octobre à mai et est dominée par les vents d'harmattan. La pluviométrie dans le village de Kamboinsé est très irrégulière d'une année à une autre.

### **II.1.2. Sols**

Ce sont des sols essentiellement ferrugineux tropicaux, de type latérico-argileux reposant sur une grande masse de granites fissurés. Ces sols sont généralement pauvres, fragiles et par conséquent vulnérables à l'érosion.

### **II.1.3. Végétation**

Typique aux zones rurales de la région centrale du Burkina Faso, le couvert végétal est dominé par une savane arbustive claire parsemée comportant quelques grands arbres, des arbres de taille moyenne (karité, néré, baobab), arbustes notamment épineux et une strate herbacée.

### **II.1.4. Activités de la population**

Les principales activités des habitants de Kamboinsé sont l'agriculture, le commerce et l'élevage. L'agriculture constitue la principale source de revenus de plus de 60% de la population active. Les types de cultures pratiquées sont : les cultures vivrières, les cultures maraîchères aux abords du barrage. L'élevage occupe 25% de la population et est à tendance intensive (bovins, petits ruminants et volailles). Le commerce, qui occupe 15% de cette population porte essentiellement sur des activités informelles (Adoum, 2011).

## **II.2. Prélèvement et analyse des eaux d'irrigation**

### **II.2.1 Prélèvement des échantillons**

Les eaux grises traitées utilisées dans le cadre de la présente étude proviennent de deux systèmes de traitement différents. Les eaux grises traitées des familles pilotes sont issues d'un système de traitement autonome par bacs inclinés tandis que les eaux grises traitées de la cité de Kamboinsé proviennent d'un système collectif de traitement par étang algal à haut rendement. Les prélèvements d'échantillons ont été effectués dans sur le site expérimental à Kamboinsé où les eaux utilisées pour l'irrigation des différentes parcelles ont été stockées. Les eaux concernées sont les eaux grises traitées provenant des familles pilotes de Kamboinsé, les eaux grises traitées de la cité universitaire de Kamboinsé, les eaux du barrage et de l'eau de puits. Des flacons en polyéthylène (PEHD) ont été utilisés pour les

prélèvements destinés aux analyses physico-chimiques. Les eaux destinées aux analyses microbiologiques ont été prélevées dans des flacons stériles en verre borosilicatés. Une fois le prélèvement effectué, les flacons ont été rangés dans une glacière munie d'accumulateurs de froid à 4°C pour être immédiatement acheminés au laboratoire afin d'effectuer les différentes analyses. Les analyses ont été faites dans les locaux du Laboratoire Eau Dépollution Ecosystèmes et Santé (LEDES) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Pendant le prélèvement, certains paramètres tels que le pH, la température, la conductivité électrique et l'oxygène dissout ont été mesurés sur place :

- le pH a été mesuré avec un pH mètre WTW 3310 ;
- l'oxygène dissout et la température ont été mesurés à l'aide d'un oxymètre portable EcoSense DO 200 ;
- la conductivité électrique a été mesurée avec un multi paramètres WTW 350i.

Pour toutes ces déterminations, les équipements ont été au préalable calibrés avec des solutions étalons certifiées.

### II.2.2. Analyses des paramètres physico-chimiques des eaux d'irrigation

 Les matières en suspension (MES) ont été déterminées par filtration d'un volume d'eau (50 mL) sur un filtre wathman de porosité 0.45µm. Le filtre et son substrat ont été soigneusement séchés dans une étuve à 105°C pendant environ une heure. Ce qui nous a permis d'obtenir la masse M1 du filtre. Au préalable, le filtre avait été séché à l'étuve à 105°C pendant environ 30mn afin de déterminer sa masse initiale M0. La concentration en MES a été calculée en utilisant la formule suivante :  $MES (mg/L) = \frac{M_1 - M_0}{V} \times 1000$  (1)

M<sub>0</sub> : Masse de la membrane filtrante avant utilisation en mg

M<sub>1</sub> : Masse de la membrane filtrante après utilisation en mg

V : Volume d'eau utilisé en mL

 La Demande Chimique en Oxygène (DCO) a été déterminée après oxydation chimique en milieu acide fort par un excès de dichromate de potassium (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) pendant environ deux heures. Ensuite la lecture a été faite avec le Spectrophotomètre DR 2000 HACH. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO<sub>5</sub>) a été déterminée par la méthode respirométrique à l'aide d'un OxiTop.

Les concentrations en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ont été obtenues par complexométrie à l'aide d'une solution du sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique (EDTA) en présence du Noir Eriochrome T (NET) et du calcon comme indicateurs colorés. Les composés azotés ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) et phosphorés ( $\text{PO}_4^{3-}$ , P total) ainsi que les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ont été déterminés avec le Spectrophotomètre HACH DR 2000. L'azote total a été déterminé à partir de la méthode kjeldahl. Les concentrations en sodium ( $\text{Na}^+$ ) et potassium ( $\text{K}^+$ ) ont été déterminées à l'aide d'un spectrophotomètre à émission de flamme de type JENWAY PFP7.

L'effet du sodium dans l'eau d'irrigation est estimé par le ratio d'absorption du sodium (SAR). Le SAR décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), qui eux, peuvent être tolérés en quantité relativement grande dans l'eau d'irrigation. La formule permettant de calculer le SAR est la suivante :

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{2}}} \quad (2) \quad \text{où } \text{Na}^+, \text{Mg}^{2+} \text{ et } \text{Ca}^{2+} \text{ exprimés en meq/L}$$

Les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), les surfactants ont été respectivement déterminés à partir de l'argentimétrie, de la méthode au bleu de méthylène.

### II.2.3. Analyses microbiologiques des eaux d'irrigation

La méthode utilisée pour la détermination des germes est l'étalement en surface sur milieu de culture variant en fonction du germe recherché. L'incubation s'est déroulée dans l'enceinte d'un incubateur Memmert 37°C pour les entérocoques et les coliformes totaux, et dans l'enceinte d'un second incubateur de 44°C pour les coliformes fécaux et *E. coli*. L'ensemencement a été fait en utilisant 3×100 µL (0,3 mL) d'échantillon brut car les dilutions de l'échantillon brut ne permettaient pas de dénombrer les colonies. Le nombre de colonies dénombré a ensuite été rapporté à 100 mL. Le nombre de colonies pour 100 mL d'échantillon est obtenu par la relation:  $N \text{ (UFC/100mL)} = \frac{n}{v \times d} \times 100 \quad (3)$

N : nombre de bactéries recherché pour 100 mL d'échantillon

n : nombre de colonies caractéristiques comptées sur la boîte de Pétri

d : taux de dilution de l'échantillonensemencé

v : volume d'essai (mL)

### II.3. Choix et justification du type de culture

Le choix de la laitue (*Lactuca sativa L.*) comme culture pour cette expérimentation a pris en compte des considérations environnementales et sociales. En effet, la laitue est une culture sensible à la salinité (Shannon & Grieve, 1999). De plus, elle jouit d'une grande popularité auprès des maraîchers car elle est pratiquée dans presque toutes les provinces du Burkina Faso et beaucoup plus dans le Kadiogo et le Houet (MAHRH, 2007). En outre, c'est une culture de jardins de case qui sont des jardins individuels ou familiaux exploités durant toute l'année dans lesquels les cultures à cycle court sont privilégiées (MAHRH, 2007).

### II.4. Traitements et Design expérimental

Neufs (09) pieds de laitue ont été mis en terre sur chaque parcelle à raison d'un espacement d'environ 25 cm entre les plants et d'un espacement d'environ 30 cm entre les lignes (figure 6). Des éléments nutritifs (engrais minéral NPK) ont été apportés à toutes les parcelles afin de favoriser la croissance des plants. Les besoins en eau ont été déterminés à l'aide du logiciel CROPWAT 8.0.

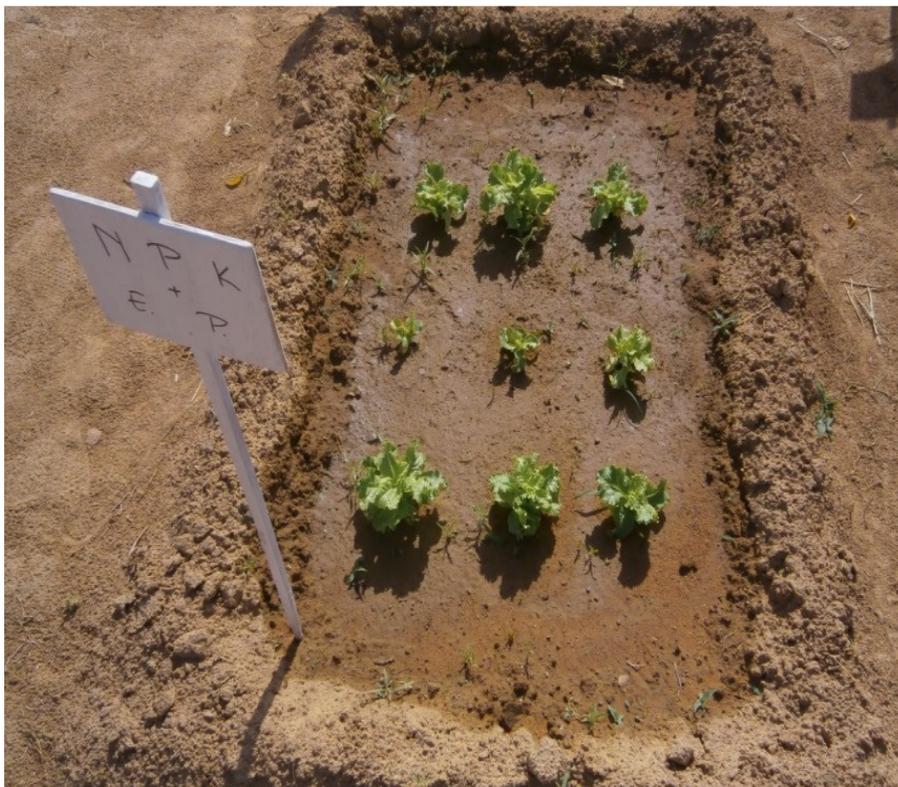


Figure 6 : Disposition de la laitue sur une parcelle

Les traitements sont au nombre de quatre (04) à savoir l'eau de barrage (traitement 0), l'eau de puits (traitement 1), l'eau grise traitée issue des familles pilotes issue du système de traitement par bacs inclinés (traitement 2) et l'eau grise traitée de la station d'épuration du campus du 2iE issue du système de traitement par étang algal à haut rendement (traitement 3). Les traitements suivis dans notre cas sont le traitement 2 (T2) et le traitement 3 (T3) qui sont des eaux grises traitées dont les possibilités de réutilisation en agriculture sont recherchées à travers cette étude. Le traitement 0 (T0) a été utilisé comme traitement témoin en raison du fait que l'eau de barrage est généralement utilisée par les maraîchers pour irriguer leurs cultures sur les sites de maraîchage. Le traitement 1 (T1) a été utilisé comme traitement complémentaire.

Le design expérimental (disposition des parcelles et les traitements appliqués) se présente comme suit :

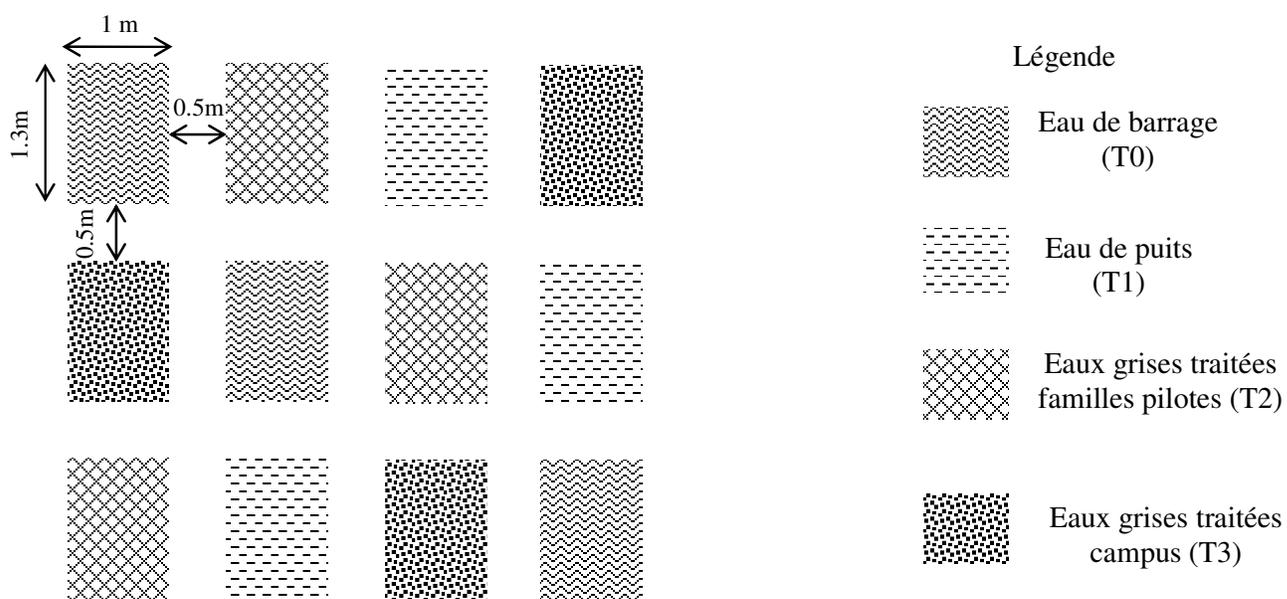


Figure 7 : Disposition des parcelles et traitements appliqués



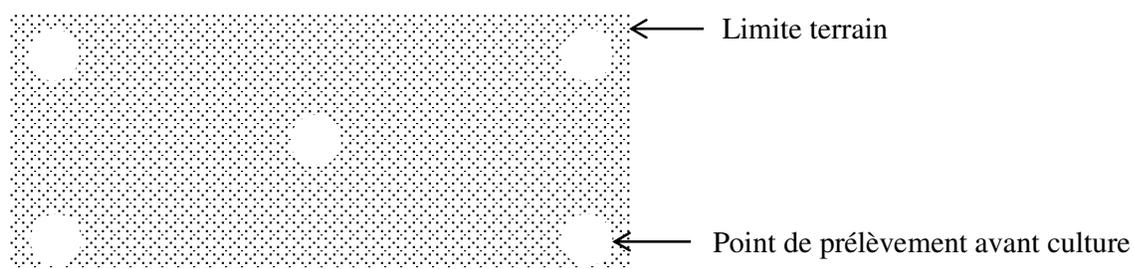
Figure 8 : Disposition des parcelles sur le champ expérimental

## **II.5. Analyse des paramètres physico-chimiques sol**

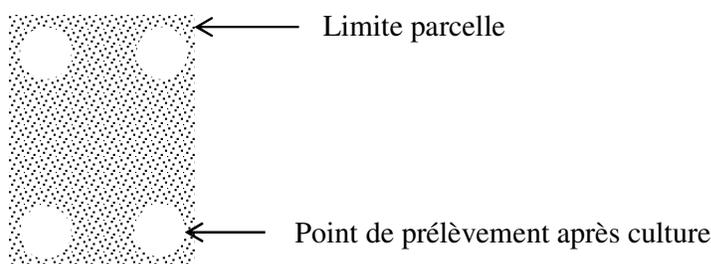
### **II.5.1. Prélèvement des échantillons de sol**

Les échantillons sol ont été prélevés sur le site expérimental dans les parcelles de culture avant le semis et après la récolte à proximité de la zone racinaire. Des échantillons composites ont été réalisés avec ces prélèvements pour les analyses. Les analyses chimiques ont été effectuées au LEDES tandis que les analyses physiques ont été faites au laboratoire Génie Civil du 2iE.

Les échantillons ont été prélevés à deux profondeurs différentes, 0-15 cm et 15-30 cm, au moyen d'une tarière puis conservés dans des sacs en plastique.



Points de prélèvement des échantillons de sol avant culture (a)



Points de prélèvement des échantillons de sol dans chaque parcelle après culture (b)

Figure 9 : Points de prélèvement des échantillons de sol avant et après culture

### II.5.2. Analyse des paramètres chimiques du sol

Les analyses chimiques ont été essentiellement faites sur la fraction fine du sol c'est-à-dire celle passant au tamis de 2 mm. Le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés par des multi paramètres analyseurs de type WTW 3310 et WTW 350i sur un extrait aqueux obtenu à partir du mélange du sol et de l'eau distillée selon un rapport de 1:2,5 et 1:5 respectivement. Le calcium et le magnésium ont été déterminés par complexométrie à l'EDTA, en présence du Noir Eriochrome T (NET) et du calcon comme indicateurs colorés. Ici également, le SAR a été évalué pour chaque traitement.

### II.5.3. Analyse des paramètres physiques du sol

L'analyse granulométrique du sol a été déterminée par tamisage sur une colonne de tamis à mailles carrées pour la fraction supérieure à 0.80  $\mu\text{m}$  et par sédimentométrie pour la fraction du sol inférieure à 0.80  $\mu\text{m}$ . La masse volumique apparente a été déterminée à l'aide d'un entonnoir métallique sur trépied avec obturateur rotatif à la partie inférieure de la tige, d'une

mesure cylindrique de 1 L et d'une règle à araser. La teneur en eau initiale du sol a été calculée après étuvage d'un échantillon de sol à 105 ° C pendant environ vingt-quatre (24) heures. L'infiltration (perméabilité du sol) a été mesurée avec le double anneau de Muntz.

## **II.6. Analyse des paramètres agronomiques des plantes**

### **II.6.1. Prélèvement des échantillons de plantes**

Un échantillon constitué des plantes les mieux développées a été retenu sur chaque parcelle pour les différentes mesures.

### **II.6.2. Mesures des paramètres agronomiques des plantes**

Les paramètres agronomiques (nombre de feuilles, masse biomasse fraîche, masse fraîche et masse sèche des feuilles) de chaque plante ont été évalués. La détermination de la masse fraîche des feuilles et de la masse sèche des feuilles nous a permis de calculer la teneur en eau des feuilles.

Le suivi de la croissance a été fait en dénombrant hebdomadairement le nombre de feuilles. Les masses de la biomasse fraîche (tige et feuilles), des feuilles fraîches et des feuilles sèches ont été déterminé avec une balance de précision. Les mesures de biomasse fraîche ont été faites dans un délai limitant au maximum les pertes d'eau par évaporation.

## **II.7. Traitement des données**

Les données ont été traitées à l'aide du logiciel XLSTAT. Elles ont fait l'objet d'une analyse de variance suivie d'un test de Tukey HSD (Honest Significant Difference) avec un intervalle de confiance de 95%. Cette analyse de la variance a permis de déterminer le comportement des traitements appliqués les uns par rapport aux autres et de déterminer les traitements permettant d'obtenir un résultat significatif ( $p < 0.05$ ) selon les variables analysées. Une analyse en composantes principales (ACP) a également été réalisée et a permis de déterminer les corrélations entre les paramètres mesurés (masse biomasse, masse feuilles, teneur en eau) et les traitements appliqués.

## III-RESULTATS ET DISCUSSION

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

#### III.1. Paramètres physico-chimiques des eaux d'irrigation

L'analyse des eaux d'irrigation utilisées durant l'expérimentation nous a permis d'obtenir les résultats consignés dans le tableau II. La concentration d'azote totale a variée entre 0,84 mg/L, obtenue dans l'eau de barrage, et 35,54 mg/L obtenue dans les eaux grises traitées provenant de familles pilotes. Quant au phosphore et au surfactants, les plus fortes concentrations ont été observées dans les eaux grises provenant du chenal algal (11,9 mg/L et 1,8 mg/L respectivement) tandis que les plus faibles concentrations (0,9 mg/L et 0 mg/L respectivement) ont été respectivement obtenues dans l'eau de puits et dans l'eau de barrage. Il faut noter que les fortes concentrations de phosphore et de surfactants dans les eaux grises proviennent généralement des détergents utilisés lors des lessives (Morel and Diener, 2006). Ces mêmes auteurs ont lié la présence de l'azote dans les eaux grises à la cuisine caractérisée par l'ammoniaque contenu dans les protéines alimentaires.

En ce qui concerne, les cations, la concentration en sodium a varié de 6,4 à 115,1 mg/L en fonction des eaux d'irrigation. La plus faible concentration en sodium est observée dans l'eau de barrage tandis que la plus forte concentration est observée dans les eaux grises traitées provenant des familles pilotes. La forte présence de sodium dans les eaux grises aurait pour origine les savons et détergents utilisés lors des lessives (Gross et al., 2005). De plus, cette forte présence dans les eaux grises issues des familles pilotes montre un faible traitement de ces eaux avec le système des bacs inclinés. De même, les valeurs les plus élevées pour le SAR (4) et le chlorure (41 mg/L) ont été observés au niveau des eaux grises traitées provenant des familles pilotes tandis que les valeurs les plus basses ont été observées au niveau de l'eau de barrage pour le SAR (0,3) et le chlorure (3,15 mg/L).

D'une manière générale les valeurs obtenues pour la majorité des paramètres sont situées dans la plage des recommandations pour la réutilisation des eaux grises pour l'irrigation présentées plus haut. Toutefois, on observe des valeurs relatives à la conductivité électrique, au chlorure et au SAR qui sont plus élevées dans les eaux grises traitées provenant des familles pilotes. Ces valeurs élevées pourraient être dues aux types de savons utilisés dans les familles pilotes. On retiendra par ailleurs qu'un SAR > 3 affecte certaines cultures en fonction de la conductivité de l'eau (OMS, 2006). En outre, la concentration de sodium est supérieure aux 100 mg/L recommandés ; ce qui pourrait avoir des effets négatifs sur le sol en fonction de la conductivité, du SAR et des conditions de drainage du terrain (OMS, 2006).

Tableau II : Paramètres chimiques des eaux d'irrigation

	EB	EP	EGTFP	EGTS	RECOMMANDATIONS*
pH	7,54	7,3	7,14	7,34	6,5-8,5
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	189,7	243,5	1158	497,5	< 3000
Azote total (mg/L)	0,84	5,42	35,54	15,9	20-85
Phosphore total (mg/L)	2,8	0,9	2,6	11,9	6-20
Potassium (mg/L)	11,5	2,9	65,4	23,1	-
Sodium (mg/L)	6,4	9,6	115,1	70,3	< 100
Calcium (mg/L)	20,4	29,2	46,8	19,8	< 200
Magnésium (mg/L)	4	10,2	9,5	4,4	< 200
Chlorure (mg/L)	3,15	3,15	41	19,6	< 350
Surfactants (mg/L)	0	0,3	0,8	1,8	8
SAR	0,3	0,4	4	3,7	3-9

(\* Cf. tableau I pour les références)

### III.2. Paramètres physico-chimiques du sol

L'analyse granulométrique du sol du site expérimental à deux profondeurs différentes nous a permis de déterminer la proportion des éléments qui composent la texture du sol, à ces profondeurs, selon le diagramme de classification du Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée (GEPPA) qui comporte 17 classes. Il ressort de cette classification que le sol a une texture sablo-argilo-limoneuse à la profondeur 0-15 et une texture limono-argilo-sableuse pour la profondeur 15-30. La proportion d'éléments fins est donc plus importante entre 15 et 30 cm. Le pH eau révèle un sol acide avant culture qui tend vers la neutralité après culture. La faible teneur en ions du sol ressort à travers la conductivité électrique qui est de 226  $\mu\text{S/cm}$  en moyenne et qui tend à la baisse après culture.

La vitesse moyenne d'infiltration varie entre  $4.14 \times 10^{-4}$  m/s, observée sur le sol initial et  $5.10 \times 10^{-4}$  m/s observée au niveau des parcelles irriguées avec les eaux grises traitées issues des familles pilotes (T2). Cependant, en observant les courbes de la hauteur d'eau infiltrée en fonction du temps (annexe 5), on remarque que la hauteur d'eau infiltrée au niveau des

parcelles de T2 est plus faible que celle infiltrée dans le sol initial, pour une hauteur d'eau initiale et un temps de mesure identiques pour toutes les mesures effectuées. Ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que la structure du sol a été modifiée à un certain niveau par l'irrigation avec les eaux grises traitées provenant des familles pilotes limitant ainsi la hauteur d'eau infiltrée dans un laps de temps donné. Une forte concentration en sels combinée à l'action de polluants tels que les surfactants, les huiles et les graisses peuvent en effet conduire à une baisse de la perméabilité du sol ou à une dégradation graduelle de sa structure (Sawadogo et al., 2013 ; Shafran et al., 2005; Travis et al., 2010).

Les résultats obtenus sur la caractérisation physico-chimique du sol sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III : Paramètres physico-chimiques du sol avant et après culture

	E0		EB		EP		EGTFP		EGTS	
	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30
<b>Sable grossier %</b>	35	22	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Sable fin %</b>	23	26	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Limon %</b>	23	29	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Argile %</b>	19	23	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Masse volumique apparente (kg/l)</b>	1,4	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>pH</b>	5,32±0,04	5,67±0,04	5,84±0,23	6,18±0,21	6,28±0,28	6,34±0,21	6,55±0,21	6,11±0,11	6,33±0,20	6,17±0,43
<b>CE (µS/cm)</b>	269±13	183,2±7,6	42,5±7,8	52,0±7,26	40,7±2	51,8±3,06	84,2±6,57	113,4±13	47,6±6,05	42,3±10,46
<b>SAR</b>	0,1±0,05	0,1±0,05	0,3±0,07	0,1±0,05	0,2±0,02	0,2±0,03	1,0±0,21	0,8±0,12	0,4±0,06	0,4±0,12
<b>Vitesse d'infiltration (m/s)</b>	4,14×10 <sup>-4</sup>		4,62×10 <sup>-4</sup>		4,96×10 <sup>-4</sup>		5,10×10 <sup>-4</sup>		4,50×10 <sup>-4</sup>	

Les résultats obtenus suite à l'analyse des paramètres chimiques du sol montrent que le pH des sols irrigués a eu tendance à croître comparativement à celui de l'état initial (5,32 et 5,67). Les valeurs moyennes obtenues après culture sont en effet comprises entre 5,84 et 6,55. Une analyse de la variance réalisée sur les données obtenues à partir de ces résultats fait ressortir à la profondeur 0-15 cm une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre le pH du sol initial et les pH du sol des traitements T1, T2 et T3 comme indiqué sur la figure 10.

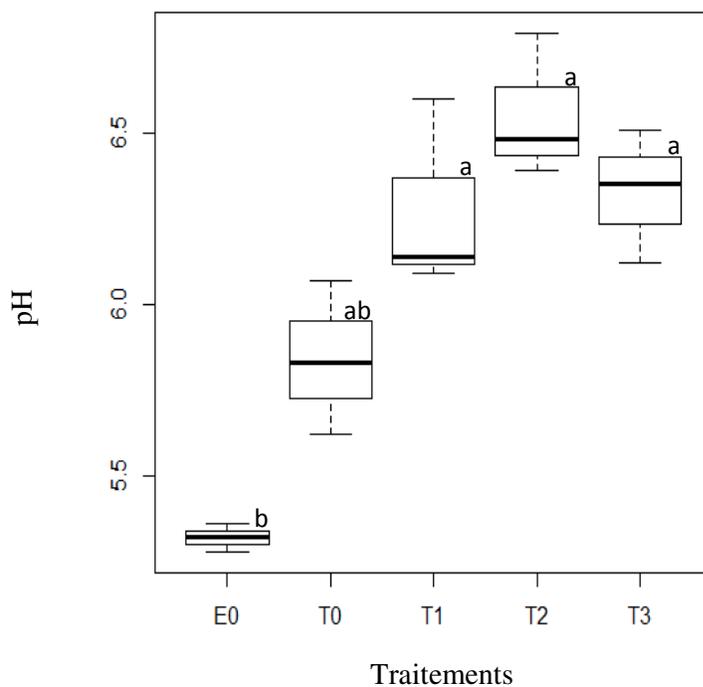


Figure 10 : Variation du pH entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 0 et 15 cm

Pour la profondeur 15-30 cm, une différence significative a été observée entre le pH du sol de T1 et celui du sol de l'état initial (figure 11).

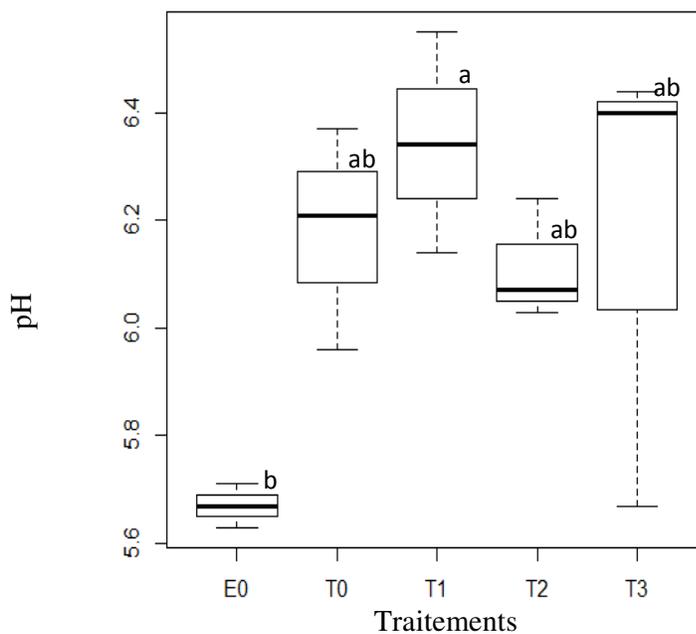


Figure 11 : Variation du pH entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 15 et 30 cm

L'augmentation du pH des sols irrigués peut être liée à l'effet de dilution des eaux d'irrigation qui ont eu tendance à influencer sur le pH relativement acide du sol pour le faire tendre vers la neutralité. Cette variation est favorable aux cultures et au sol car elle conduit à des valeurs de pH comprises dans une plage beaucoup plus convenable. En effet, selon Pinto et al., (2009) le pH du sol affecte considérablement la disponibilité de certains nutriments du sol et une valeur du pH comprise entre 6 et 7,5 est généralement considérée comme optimale pour la croissance de plusieurs plantes et la santé microbienne du sol.

La conductivité électrique des parcelles irriguées a par contre eu tendance à décroître comparativement à celle du sol initial (269 et 183  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Les valeurs moyennes ont varié entre 40,7  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 113,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  après la période culturale. Une analyse de la variance a permis de déceler d'une part, à la profondeur 0-15 cm l'existence d'une baisse significative ( $p < 0,05$ ) entre la conductivité électrique du sol de T2 et celles des sols des autres traitements et du sol de E0. Et d'autre part entre la conductivité électrique du sol initial et celles des sols des traitements T1, T0 et T3 comme le montre la figure 12.

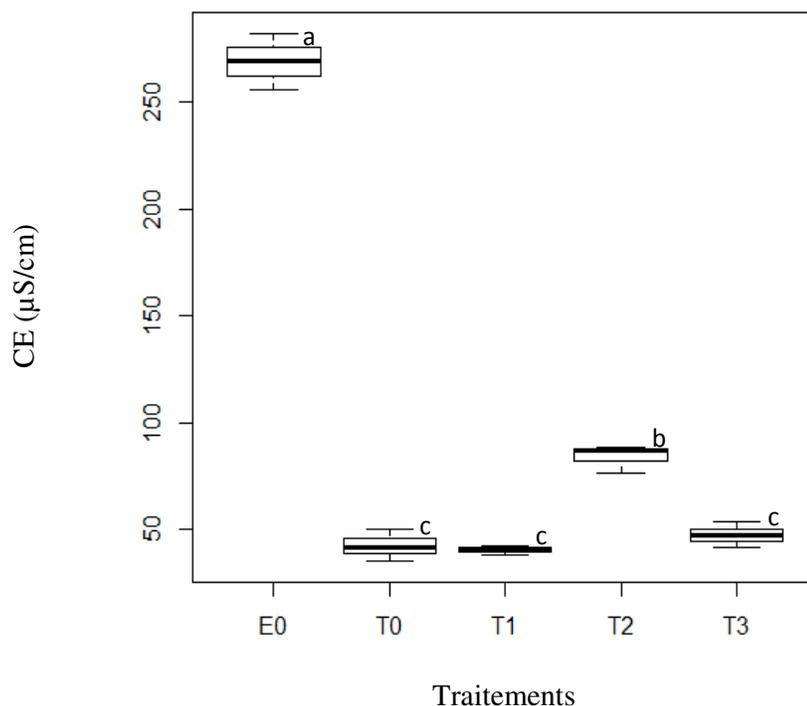


Figure 12 : Variation de la conductivité électrique entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 0 et 15 cm

A la profondeur 15-30 cm, il n'y a aucune différence significative entre la conductivité électrique du sol de l'état initial et celle des sols des traitements (figure 13).

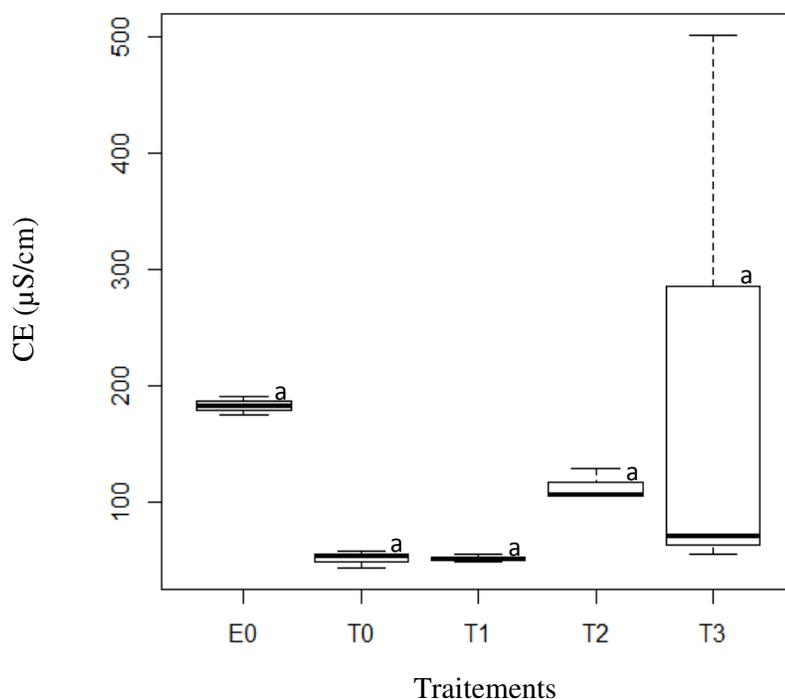


Figure 13 : Variation de la conductivité électrique entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise 15 et 30 cm

La baisse de la conductivité électrique peut être expliquée par le fait que les plants ont contribué à réduire la teneur en ions dans le sol à travers l'absorption des oligo-éléments nécessaires à leur croissance. Cette baisse pourrait également être liée au drainage des sels dû à l'irrigation régulière et aux pluies tombées de façon exceptionnelle durant la période de culture (53 mm). Travis et al., (2010) ont observé une augmentation du niveau du pH du sol après culture par rapport à l'état initial. Par contre au terme de leur étude, ils ont observé une augmentation de la conductivité électrique du sol en comparaison de l'état initial. Il faut noter que ces auteurs ont mené leurs expérimentations sous une serre et dans des pots. Par ailleurs, Al-Hamaiedeh & Bino, (2010) ont également notifié une augmentation de la salinité et du SAR du sol dans le temps après irrigation avec des eaux grises. Ces derniers ont attribué cette augmentation à l'évaporation, à la faiblesse des pluies et à l'absence d'un système de drainage.

Une tendance à la hausse a été remarquée entre le SAR du sol initial (0,1) et celui des sols irrigués (en particulier ceux irrigués avec les eaux grises) après l'expérimentation. Les valeurs moyennes après culture sont en effet comprises entre 0,1 et 1. La réalisation d'une analyse de la variance a révélé entre 0 et 15 cm une différence significative entre le SAR du sol de T2 et celui du sol de l'état initial d'une part et entre le SAR du sol de T2 et ceux des sols de T0, T1 et T3 d'autre part ; puis entre le SAR du sol de T3 et celui du sol de l'état initial (figure 14).

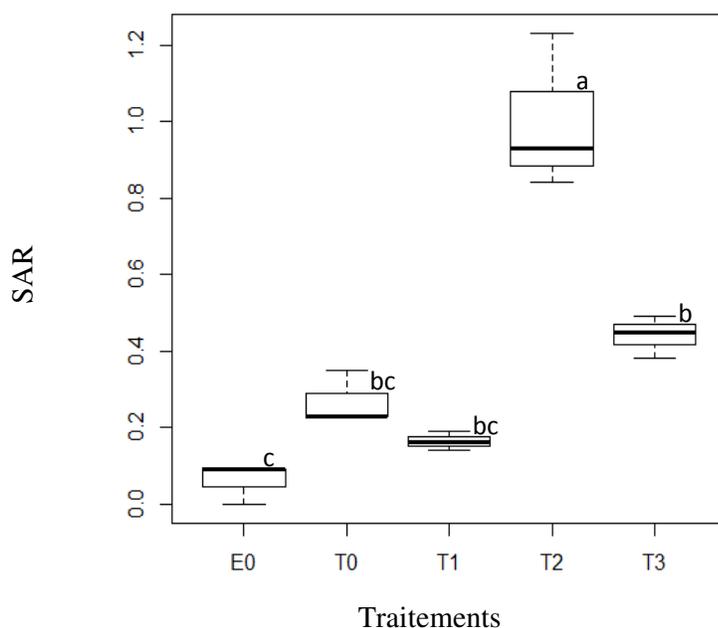


Figure 14 : Variation du SAR entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 0 et 15 cm

Par ailleurs, entre 15 et 30 cm, la valeur du SAR du sol T2 est significativement supérieure ( $p < 0,05$ ) à celles des sols de T0, T1, T3 et du sol initial.

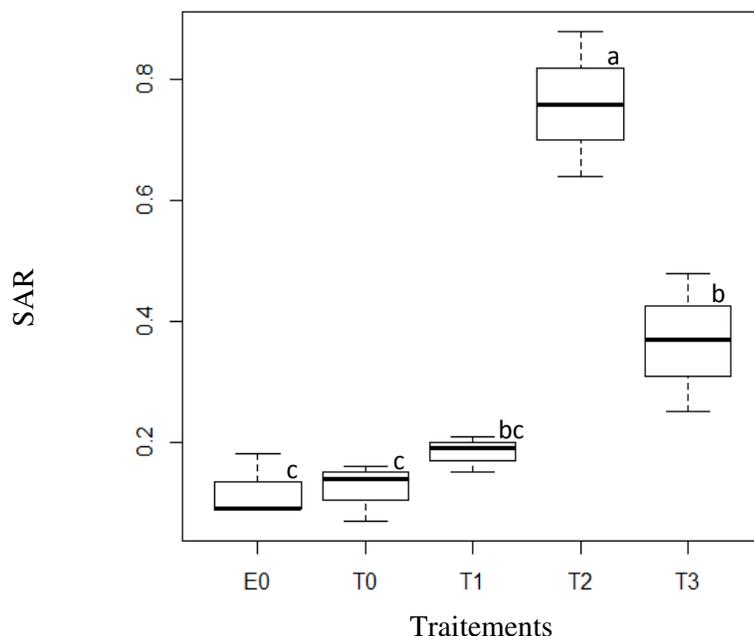


Figure 15 : Variation du SAR entre l'état initial et les traitements à une profondeur comprise entre 15 et 30 cm

Cette augmentation du SAR pourrait être due aux valeurs élevées de sodium dans les eaux grises traitées des familles pilotes. L'accumulation du sodium en excès dans le sol est pourtant un facteur qui prédispose le sol à des risques environnementaux futurs (Misra & Sivongxay, 2009).

### III.3. Paramètres agronomiques

#### Croissance

Le suivi de la croissance de la laitue a été fait dans le temps à travers le décompte du nombre de feuilles en fonction des traitements. En effet, chaque semaine le nombre de feuilles portées par les plants de chaque traitement était évalué. De l'analyse des résultats issus du traitement des données obtenues suite à ces mesures, il ressort que durant les premières semaines de l'expérimentation, les pieds de laitue irrigués avec l'eau de barrage avaient un nombre de feuilles supérieur au nombre de feuilles des autres traitements. Par contre durant les dernières semaines de culture les pieds de laitue irrigués avec l'eau de puits et l'eau grise provenant du chenal algal présentaient un plus grand nombre de feuilles comparativement aux autres traitements. L'évolution du nombre de feuilles des pieds de laitue irrigués avec l'eau grise provenant des familles pilotes est restée en marge de l'évolution du nombre de feuilles des plants irrigués avec les autres eaux. Durant la période

d'expérimentation, les pieds de laitue irrigués avec cette eau grise ont effectivement eu un nombre de feuilles inférieur aux autres traitements comme l'indique la figure ci-dessous.

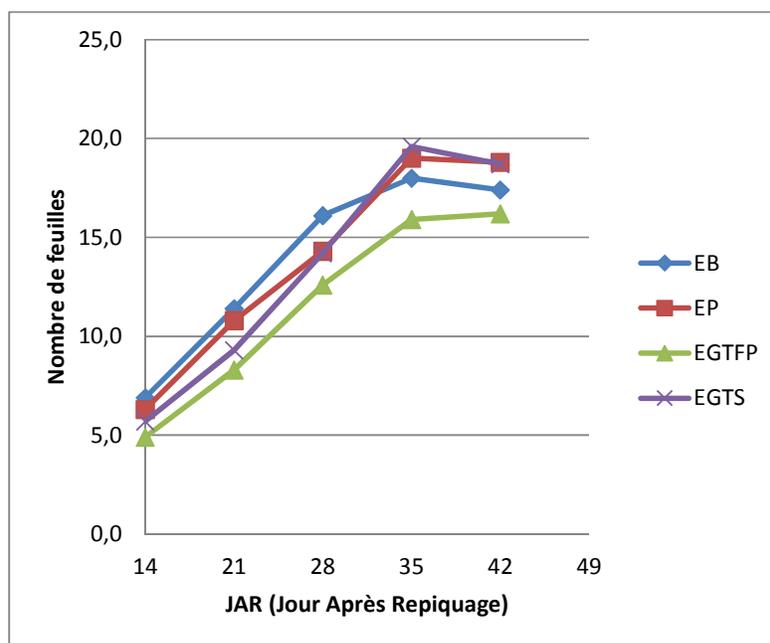


Figure 16 : Evolution du nombre de feuilles de la laitue durant le cycle cultural

La réalisation d'une analyse en composantes principales nous a par ailleurs permis d'obtenir des valeurs propres permettant de déterminer la corrélation existant entre ces valeurs propres et la contribution de chacune d'elles à la formation des différents axes.

Tableau IV : Valeurs propres (a)

	F1	F2	F3
Valeur propre	3,692	1,194	0,113
Variabilité (%)	73,850	23,889	2,262
% cumulé	73,850	97,738	100,000

Le tableau ci-dessus montre que les deux (02) premières valeurs propres contribuent significativement à la formation des axes étant donné qu'elles expliquent 97,7 % de l'information. Les individus et les variables sont donc principalement représentés par le système formé par les deux premiers axes factoriels.

Tableau V : Matrice de corrélation (a)

Variabes	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4	Semaine 5
Semaine 1	<b>1</b>	0,994	0,954	0,523	0,473
Semaine 2	0,994	<b>1</b>	0,916	0,481	0,454
Semaine 3	0,954	0,916	<b>1</b>	0,510	0,397
Semaine 4	0,523	0,481	0,510	<b>1</b>	0,974
Semaine 5	0,473	0,454	0,397	0,974	<b>1</b>

La matrice de corrélation indique une corrélation entre les semaines 1, 2 et 3 d'une part et entre les semaines 4 et 5 d'autre part. Nous pouvons donc dire que l'évolution des plants durant les trois premières semaines de culture était à peu près la même mais change durant les deux dernières semaines de culture. (Figure 17).

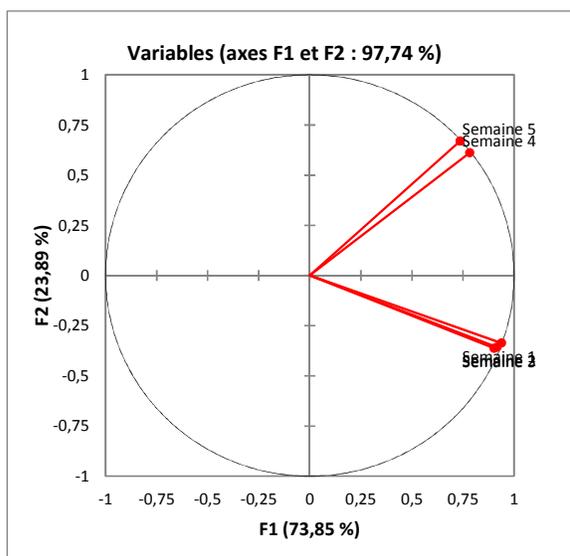


Figure 17: Cercle des corrélations (a)

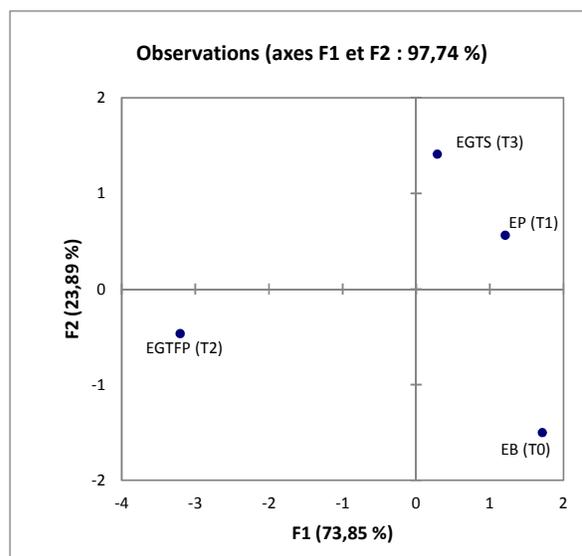


Figure 18 : Graphique des individus (a)

A partir du graphique des individus nous remarquons que le traitement 3 (EGTS) semble partager des caractéristiques avec le traitement 1 (EP). En faisant la relation avec le cercle de corrélation, nous pouvons dire que les traitements 1 et 3 ont connu une évolution assez similaire durant les semaines 4 et 5 de culture. Par contre, le traitement 1 a plutôt connu une meilleure croissance durant les 3 premières semaines de culture. Le traitement 2 (EGTFP) quant à lui, a connu une évolution différente de celle des autres traitements durant toute la période de culture. Cette différence pourrait être due aux valeurs élevées du sodium, de la

conductivité électrique et du SAR observées dans les eaux grises provenant des familles pilotes.

L'analyse de la variance effectuée sur les données de l'évolution des plants durant la période de culture montre qu'il y a une différence significative entre le traitement 0 (EB) et le traitement 2 (EGTFP) durant les deux premières semaines de culture.

#### Rendement

Une analyse en composantes principales des données de rendement nous a permis d'obtenir les résultats suivants. Le tableau ci-dessous montre que les deux (02) premières valeurs propres contribuent significativement à la formation des axes étant donné qu'elles expliquent 99,9 % de l'information. Les individus et les variables sont donc principalement représentés par le système formé par les deux premiers axes factoriels.

Tableau VI : Valeurs propres (b)

	F1	F2	F3
Valeur propre	3,763	0,237	0,001
Variabilité (%)	94,063	5,917	0,020
% cumulé	94,063	99,980	100,000

Par ailleurs, le tableau VII présente la matrice de corrélations qui indique que la variable biomasse est positivement corrélée aux variables masse feuilles fraîches, masse feuilles sèches et teneur en eau. Cependant, la corrélation entre la variable masse feuilles sèches et les variables masse feuille fraîche et teneur en eau est relativement plus faible. (Figure 19)

Tableau VII : Matrice de corrélation (b)

Variables	Masse biomasse	Masse feuilles fraîches	Masse feuilles sèches	Teneur en eau feuilles
Masse biomasse	<b>1</b>	0,987	0,932	0,957
Masse feuilles fraîches	0,987	<b>1</b>	0,863	0,991
Masse feuilles sèches	0,932	0,863	<b>1</b>	0,789
Teneur en eau feuilles	0,957	0,991	0,789	<b>1</b>

En faisant la relation entre le graphique des individus et le cercle de corrélation nous pouvons dire que l'irrigation avec l'eau de puits (EP) a permis d'obtenir les meilleurs résultats en termes de biomasse, de feuilles fraîches et de teneur en eau des feuilles. Cependant,

l'irrigation avec l'eau de barrage (EB) nous a permis d'obtenir des plants dont la masse sèche des feuilles est plus importante que ceux irrigués avec l'eau de puits. Les feuilles obtenues suite à l'irrigation avec l'eau de barrage sont donc plus riches en matière végétale que celles issues de l'irrigation avec l'eau de puits.

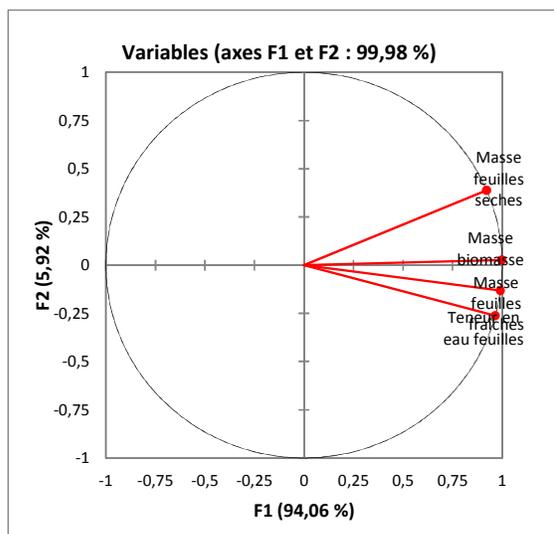


Figure 19 : Graphique des individus (b)

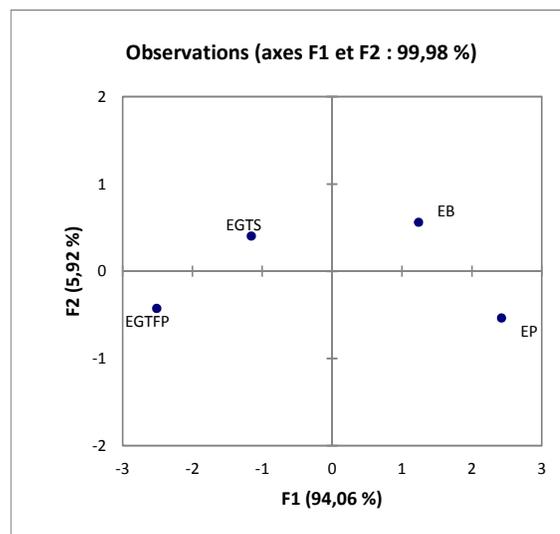


Figure 20 : Cercle des corrélations (b)

L'analyse de la variance des données obtenues sur le rendement des feuilles sèches n'a révélé aucune différence significative entre les traitements. Cependant, comme le montre la figure 13, la moyenne de T0 (0,03 t/ha) est identique à celle du T1 et à celle du T3. Le traitement 2 par contre à une moyenne (0,02 t/ha) légèrement différente de celle des autres traitements (figure 21). Cette différence pourrait être due à un effet négatif induit par les eaux grises traitées des familles pilotes dont les valeurs de sodium et de SAR sont assez élevées par rapport à celles des autres eaux d'irrigation. En effet, une concentration de sodium supérieure à 100 mg/L et une forte salinité entraînent une baisse du rendement des cultures sensibles (OMS, 2006). De plus, ces eaux grises ont une conductivité électrique relativement élevée environ 1158  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et une concentration en chlorure (41 mg/l) qui peuvent être préjudiciables à la culture de la laitue. Par ailleurs, Finley et al., (2009) ont trouvé qu'en terme de poids sec de culture (carotte, laitue, poivron) par bloc expérimental, aucune différence significative n'a été observée entre les blocs irrigués avec des eaux grises et les blocs recevant l'eau du robinet. Ces derniers ont attribué cette absence de différence significative à la pauvreté des eaux grises en nutriments. En outre, Travis et al. (2010) n'ont pas trouvé de

différence significative entre les masses sèches des pieds de laitue irrigués avec les eaux grises et celles irriguées avec de l'eau douce.

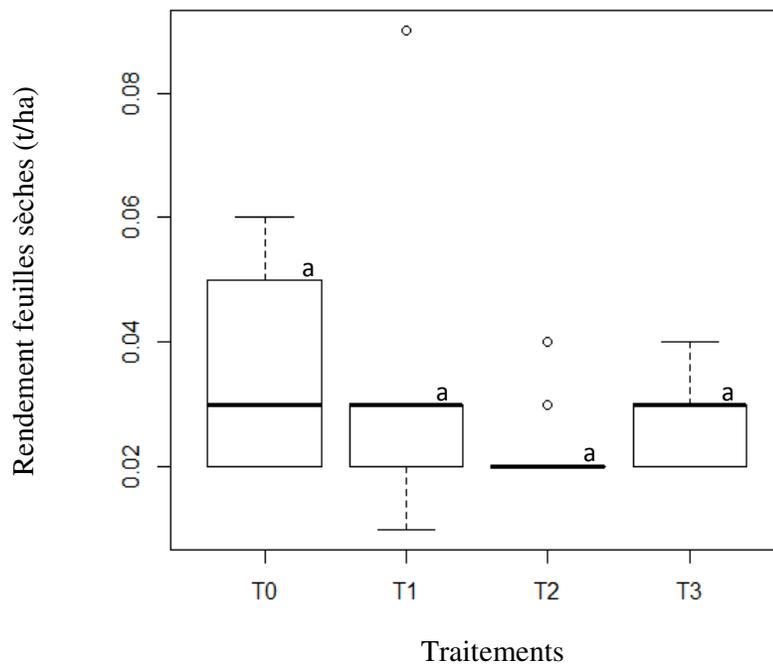


Figure 21 : Variation du rendement de feuilles sèches en fonction des traitements

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude conduite en milieu sahélien durant la saison sèche a permis d'évaluer le potentiel de la réutilisation des eaux grises traitées en agriculture maraîchère. Nos résultats montrent que les eaux grises traitées peuvent être utilisées à la fois en tant que source de nutriments et d'approvisionnement en eau pour des cultures dans le maraîchage dans les zones confrontées à une pénurie d'eau douce. En effet, les eaux grises provenant de deux systèmes de traitement différents dont l'un autonome (système de traitement par bacs inclinés) et l'autre collectif (système de traitement par étang algal à haut rendement) ont été utilisées pour irriguer de la laitue pendant environ deux (02) mois. Il ressort de la caractérisation des eaux d'irrigation que les eaux grises provenant du système de traitement par bacs inclinés contiennent souvent des concentrations élevées d'éléments nocifs supérieures aux recommandations de l'OMS. Ces eaux grises ne sont donc pas conformes aux normes de réutilisation des eaux grises en agriculture. En outre, les résultats des rendements agronomiques ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats obtenus à partir de l'irrigation avec les eaux grises traitées d'une part et ceux obtenus avec les eaux de barrage et de puits d'autre part. L'irrigation avec les eaux grises traitées n'a donc pas permis d'améliorer la croissance et le rendement des plantes. De plus la période culturale (mars-mai) est une des plus chaudes de l'année dans notre contexte et donc inadaptée à la culture de la laitue surtout lorsque cette dernière, sensible aux températures élevées, est directement exposée aux rayonnements solaires. Par ailleurs, au niveau du sol des différences significatives ont été observées entre l'état initial et le sol des parcelles dans lesquelles les eaux grises ont été appliquées. Cela implique que les eaux grises traitées ont impacté le sol aussi bien positivement que négativement.

Cependant, une réutilisation adéquate des eaux grises traitées en agriculture dans le contexte sahélien, passera donc d'une part par un meilleur choix de la période culturale ou d'un emplacement adapté (bas fond) qui permettra de réduire les températures. D'autre part, une amélioration de la qualité des eaux grises à travers un contrôle à la source (réduction du taux d'utilisation de savons et détergents riches en sodium) pourrait être intéressante. Cela permettrait d'obtenir des eaux grises d'une meilleure qualité, moins concentrées en sodium.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adoum, A. (2011). Caractérisation quantitative et qualitative des eaux grises en zone péri-urbaine au Burkina Faso: Cas du village Kamboinsé. Mémoire de Master spécialisé Wash Humanitaire, 2iE, Ouagadougou, 65 p.

Ahmed M., Sidairi S., Al Prathapar S. A. and Al-Adawi S. (2008). Evaluation of custom-made and commercial greywater treatment systems: a case study from Oman. *International Journal of Environmental Studies*, 65 (1): 33-40.

Al-Hamaiedeh, H and Bino, M. (2010). Effect of treated grey water reuse in irrigation on soil and plants. *Desalination*, 256: 115–119

Al-Jayyousi, O.R. (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, 156: 181-192.

Bhausahab L. P., Saroj B. P. and Sane M.G. (2010). Design and Economical Performance of grey Water Treatment Plant in Rural Region. *International Journal of Environmental Science and Engineering*, 2(1):1-5.

Blumenthal U.J., Peasey A., Ruiz-Palacios G. and Mara D.D. (2000) Guidelines for Wastewater Reuse in Agriculture and Aquaculture: Recommended Revisions Based on New Research Evidence. WELL Study, Task No. 68 Part 1. 67p.

Burnat, J.M.Y. and Mahmoud, N. (2005). Evaluation of On-Site Gray Wastewater Treatment Plants Performance in Bilien and Biet-Diko Villages/Palestine, Environment Protection Committee (EPC).

Christova Boal, D., Eden, R.E. and McFarlane, S., (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106 (1-3): 391-397.

Commune de Ouagadougou (2010). Annuaire statistique. Ouagadougou, 183 p.

Del Porto, D. and Steinfeld, C. (1999). The composting toilet system book, 1. The Center for Ecological Pollution Prevention, Concord, 234 pp.

Ecosse D. (2001) Techniques alternatives en vue de subvenir à la pénurie d'eau dans le monde. Mémoire. D.E.S.S. « Qualité et Gestion de l'Eau », Fac. Sciences, Amiens, 62 p.

Eklund O. C. and Tegelberg L. (2010) Small-scale Systems for Greywater Reuse and Disposal A Case Study in Ouagadougou. Department of Energy and Technology, Swedish University of Agricultural sciences, Box 7070, SE - 750 07, Uppsala, Sweden, 136p.

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M. and Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1): 85-104.

FAO. (2012). Faire face à la pénurie d'eau. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 97 p.

- Faruqui N. and Al-Jayyousi O. (2002) Greywater Reuse in Urban Agriculture for Poverty Alleviation: A Case Study in Jordan. *Water International*, 27(3): 387-394.
- Finley, S. (2008). Reuse of domestic greywater for the irrigation of food crops. Master of Science degree. McGill University, Montréal, 30p.
- Finley, S., Barrington, S., & Lyew, D. (2009). Reuse of domestic greywater for the irrigation of food crops. *Journal of Water, Air, and Soil Pollution*, 199 (1-4):235-245.
- Friedler, E. (2004). Quality of individual domestic greywater streams and its implication for onsite treatment and reuse possibilities. *Environmental Technology*, 25(9): 997-1008.
- Gross, A., Azulai, N., Oron, G., Ronen, Z., Arnold, M., and Nejidat, A. (2005). Environmental impact and health risks associated with greywater irrigation: a case study, *Water Sci. & Technol.* 52 (8):161–169.
- Gross, A., Shmueli, O., Ronen, Z. and Raveh, E. (2006). Recycled Vertical Flow Constructed Wetland (RVFCW) - a novel method of recycling greywater for landscape irrigation in small communities and households. *Chemosphere*, 66 (5): (916-923).
- Guang-Guo Ying, (2005). Fate, behavior and effects of surfactans and their degradation products in the environment. *Environment International* 32: 417-431.
- Halalsheh, M., Dalahmeh, S., Sayed, M., Suleiman, W., Shareef, M., Mansour, M. and Safi, M. (2008). Grey water characteristics and treatment options for rural areas in Jordan. *Bioresource Technology*, 99 (14): 6635–6641.
- Haq, G., & Howard, C. (2012). Exploiting the co-benefits of ecological sanitation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4 (4):431-435.
- Hijikata N., Nakaoka E., Sawadogo B., Ushijiam K., Funamizu N. (2011). Phytotoxicity assay of several gray waters for reuse as agricultural irrigation in Proceedings of the IWA International conference Cities of the Future Xi'an, Xi'an.
- Jefferson B., Palmer A., Jeffrey P., Stuetz R. and Judd S. (2004) Grey water characterization and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Science and Technology*, 50 (2):157-164.
- Khodapanah L., Sulaiman W. N. A. and Khodapanah D. N. (2009) Groundwater Quality Assessment for Different Purposes in Eshtehard District, Tehran, Iran. *European Journal of Scientific Research*, 36 (4): 543-553.
- Kiplagat Kotut, Victor G. Nganga and Francis W. Kariuki (2011) Physico-Chemical and Microbial Quality of Greywater from Various Households in Homa Bay Town. *The Open Environmental Engineering Journal*, 2011, 4: 162-169.
- Li F., Behrendt J., Wichmann K. and Otterpohl R. (2008) Resources and nutrients oriented greywater for non-potable reuses. *Water Science and Technology*, 57(12): 1901-1907.

- Lina A. G., Zeeman G., Van Lier J. and Fayyed M. (2008) Quantitative and qualitative characteristics of greywater for reuse requirement and treatment alternatives: the case of Jordan. *Water Science and Technology*, 58 (7): 1385-1396.
- Lopez Z., M.A., Funamizu, N., Takakuwa, T. (2002). Onsite wastewater differentiable treatment system: modelling approach, *Wat. Sci. Tech*, 46: 317- 324.
- M.A.H.R.H. (2007). Analyse de la filière maraichage au Burkina Faso, 127 p.
- Matos, C., Sampaio, A., & Bentes, I. (2012). Reuse of domestic greywater for the irrigation of food crops. *Irrigation – Water Management, Pollution and Alternative Strategies*.
- Mekorot (2007). *Wastewater Treatment and Reclamation. Watec 2007*, Tel Aviv, Israel; 2007.
- Misra, R. K. and Sivongxay, A., (2009) Reuse of laundry greywater as affected by its interaction with saturated soil. *Journal of Hydrology*, 366: 55-61.
- Morel A. and Diener S. (2006) *Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland.96p.
- OMS. (2006). *Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères, Volume 2*. Editions de l'OMS, Genève, 254 p.
- OMS. (2012a). *Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères, Volume 1*. Edition de l'OMS, Genève, 128 p.
- OMS. (2012b). *Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères, Volume 4*. Editions de l'OMS, Genève, 234 p.
- Pinto U., Maheshwari B. L., Grewal H. S. (2009). Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties. *Resources, conservation and recycling* 54: 429-435. Australie.
- ROSA (2009). *Greywater use in peri-urban households in Kitgum, Uganda*. Makerere University ROSA Staff, Kampala, Uganda. *Sustainable sanitation practice*, issue 1: 16-24.
- Sangare, D. (2011). *Faisabilité du traitement et de réutilisation des eaux grises en milieu rural: cas de Barkoundouba (Ziniaré, Burkina Faso)*. Mémoire de Master spécialisé Génie Sanitaire et Environnement, 2iE, Ouagadougou, 64 p.
- Sawadogo B., Sou M., Hijikata N., Sangare D., Maiga A. H., and Funamizu N. (2013). Effect of detergent from greywater on irrigated plants: case of okra and lettuce. *Fondation 2iE, Ouagadougou* 4 p.
- Shafran, A.W., Gross A., Ronen Z., Weisbrod N. and Adar E. (2005). Effects of Surfactants Originating from Reuse of Greywater on Capillary Rise in the Soil. *Water Science and Technology*, 52(10-11): 157-166.

Shannon, M., & Grieve, C. (1999). Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, 78: 5-38.

Travis M.J., Weisbrod N., Gross A. (2008). Accumulation of oil and grease in soils irrigated with greywater and their potential role in soil water repellency. *Science of the Total Environment*, 394(1):68–74.

Travis MJ., Wiel-Shafran A., Weisbrod N., Adar E. and Gross A. (2010). Greywater reuse for irrigation: Effect on soil properties. *Science of the Total Environment* 408, 2501–2508

Walworth, J. L. (2006). *Soil Sampling and Analysis*. College of Agriculture and Life Sciences, Arizona, 5 p.

## ANNEXES

Annexe 1 : Besoins en eau de la laitue durant la période de culture (CROPWAT) -----	x
Annexe 2 : Résultats de la caractérisation des eaux d'irrigations -----	xi
Annexe 3: Paramètres agronomiques-----	xii
Annexe 4 : Paramètres chimiques du sol-----	xiii
Annexe 5 : Hauteur d'eau infiltrée en fonction du temps -----	xiv

Annexe 1 : Besoins en eau de la laitue durant la période de culture (CROPWAT)

La laitue cultivée (*Lactuca Sativa L.*) est une plante de la famille des Astéracées dont la profondeur racinaire peut atteindre 30 cm ou 50 cm en fonction du type de sol et du stade de développement de la plante.

**BESOINS EN EAU DES CULTURES**

Station ETo: OUAGADOUGOU  
Station Pluie: OUAGADOUGOU

Culture: Small Vegetables  
Date de plantation: 20/03

Mois	Décade	Phase	Kc coeff	ETc mm/jour	ETc mm/dec	Pluie eff. mm/dec	Bes. Irr. mm/dec
Mar	2	Init	0.70	5.33	5.3	0.1	5.3
Mar	3	Init	0.70	5.28	58.1	2.7	55.4
Avr	1	Crois	0.70	5.24	52.4	3.9	48.4
Avr	2	Crois	0.79	5.83	58.3	5.2	53.1
Avr	3	Crois	0.90	6.60	66.0	11.2	54.7
Mai	1	Mi-sais	1.02	7.31	73.1	18.5	54.6
Mai	2	Mi-sais	1.05	7.42	74.2	24.4	49.9
Mai	3	Mi-sais	1.05	6.99	76.9	26.9	50.0
Jui	1	Arr-sais	1.05	6.53	65.3	28.7	36.5
Jui	2	Arr-sais	0.99	5.76	57.6	31.5	26.2
Jui	3	Arr-sais	0.95	5.25	10.5	7.1	10.5
					597.7	160.1	444.7

## Annexe 2 : Résultats de la caractérisation des eaux d'irrigations

	<b>EB</b>	<b>EP</b>	<b>EGTFP</b>	<b>EGTS</b>
<b>T °C</b>	26°7	29°3	26°5	27°2
<b>pH</b>	7,54	7,3	7,14	7,34
<b>EC (µS/cm)</b>	189,7	243,5	1158	497,5
<b>Nt (mg/L)</b>	0,84	5,42	35,54	15,9
<b>Pt (mg/L)</b>	2,8	0,9	2,6	11,9
<b>K<sup>+</sup> (mg/L)</b>	11,5	2,9	65,4	23,1
<b>Na (mg/L)</b>	6,4	9,6	115,1	70,3
<b>Ca<sup>2+</sup> (mg/L)</b>	20,4	29,2	46,8	19,8
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg/L)</b>	4	10,2	9,5	4,4
<b>Cl<sup>-</sup>(mg/L)</b>	3,15	3,15	41	19,6
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	0	2	6	0
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0	2,3	18,9	7,5
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	1	0	37	7
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	0,69	0,57	1,55	5,8
<b>F<sup>-</sup></b>	0,1	0,43	0,19	0,13
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	0,13	2,73	7	0,63
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	0	0	0	0
<b>DBO<sub>5</sub></b>	-	0	430	100
<b>DCO</b>	5	0	123	413
<b>MES</b>	0,024	0	0,048	0,212
<b><i>E. Coli</i></b>	0	0	1,67×10 <sup>2</sup>	0
<b>Streptocoques</b>	0	0	0	0
<b>Coliformes totaux</b>	3,50×10 <sup>3</sup>	3,33×10 <sup>3</sup>	3,67×10 <sup>3</sup>	5,72×10 <sup>4</sup>

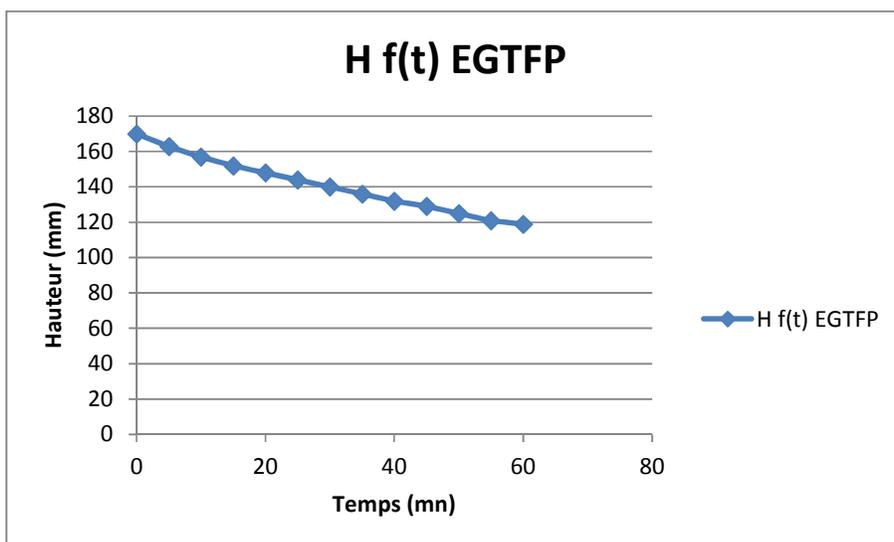
## Annexe 3: Paramètres agronomiques

Traitements	Rendements (t/ha)			Nombre de feuilles				
	Biomasse Fraîche	Rendement feuilles fraîches	Rendement feuilles sèches	JAR 14	JAR 21	JAR 28	JAR 35	JAR 42
<b>T0</b>	1	0,45	0,09	8	12	21	17	15
<b>T0</b>	0,43	0,22	0,03	7	12	17	15	14
<b>T0</b>	0,17	0,05	0,01	7	10	13	14	12
<b>T0</b>	0,26	0,12	0,02	8	15	19	16	15
<b>T0</b>	0,32	0,12	0,02	7	15	19	23	20
<b>T0</b>	0,32	0,19	0,03	6	10	15	18	17
<b>T0</b>	0,35	0,15	0,03	8	12	18	26	23
<b>T0</b>	0,39	0,16	0,03	6	9	12	17	22
<b>T0</b>	0,32	0,15	0,02	5	8	11	16	19
<b>T1</b>	0,28	0,08	0,02	7	13	17	18	16
<b>T1</b>	0,22	0,13	0,02	5	9	13	16	16
<b>T1</b>	0,31	0,10	0,02	5	10	16	20	17
<b>T1</b>	0,42	0,22	0,05	8	11	15	21	20
<b>T1</b>	0,28	0,10	0,03	7	10	13	21	19
<b>T1</b>	0,50	0,16	0,05	5	9	14	18	18
<b>T1</b>	0,42	0,22	0,04	10	17	20	27	25
<b>T1</b>	0,69	0,29	0,06	5	9	11	16	17
<b>T1</b>	0,21	0,10	0,02	5	9	10	14	21
<b>T2</b>	0,34	0,06	0,02	3	5	6	8	12
<b>T2</b>	0,17	0,05	0,02	3	6	6	8	16
<b>T2</b>	0,28	0,11	0,02	3	6	8	9	13
<b>T2</b>	0,27	0,14	0,02	5	9	12	17	16
<b>T2</b>	0,22	0,14	0,02	6	10	15	19	17
<b>T2</b>	0,18	0,11	0,02	5	9	13	18	16
<b>T2</b>	0,32	0,13	0,02	6	8	13	18	18
<b>T2</b>	0,37	0,14	0,03	8	13	27	28	21
<b>T2</b>	0,45	0,17	0,04	5	8	13	18	17
<b>T3</b>	0,20	0,09	0,02	5	8	15	21	20
<b>T3</b>	0,25	0,10	0,02	5	8	14	18	16
<b>T3</b>	0,22	0,07	0,03	8	11	16	18	17
<b>T3</b>	0,59	0,22	0,04	6	11	16	22	19
<b>T3</b>	0,17	0,06	0,02	7	12	14	22	19
<b>T3</b>	0,19	0,09	0,02	4	7	11	14	23
<b>T3</b>	0,54	0,20	0,04	6	9	14	22	19
<b>T3</b>	0,39	0,18	0,03	5	9	14	20	16
<b>T3</b>	0,34	0,13	0,03	5	9	14	19	19

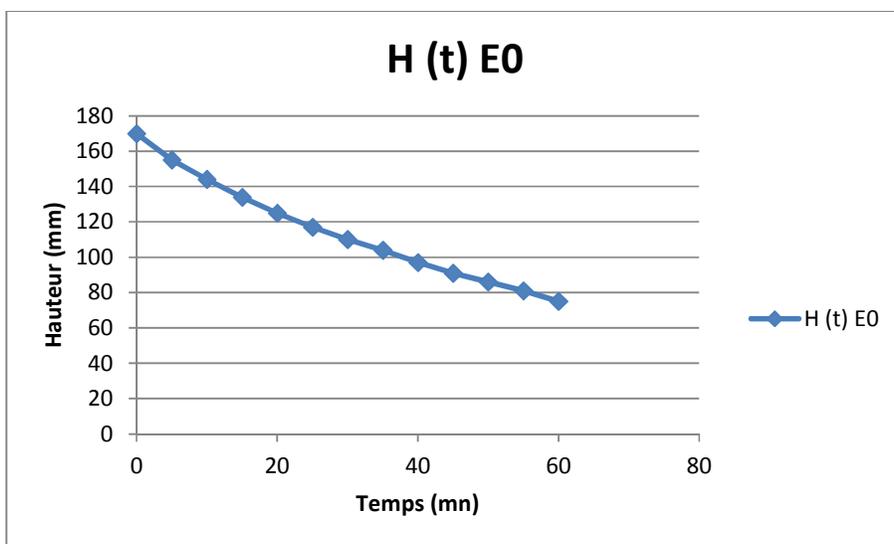
## Annexe 4 : Paramètres chimiques du sol

<b>0-15</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>Mg</b>	<b>Ca</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>	<b>SAR</b>
<b>E0</b>	5,36	256	1,92	4,8	0,93	0,99	0,09
<b>E0</b>	5,32	269	1,92	4,8	0,00	0,99	0,00
<b>E0</b>	5,28	282	1,92	4,8	0,93	0,99	0,09
<b>T0</b>	5,62	50	3,36	5,6	2,78	0,99	0,23
<b>T0</b>	6,07	35,7	0,96	3,2	1,85	0,99	0,23
<b>T0</b>	5,83	41,7	1,44	2,4	2,78	0,99	0,35
<b>T1</b>	6,09	42,6	12,48	2,4	2,78	0,99	0,16
<b>T1</b>	6,14	38,6	5,76	6,4	2,78	0,99	0,19
<b>T1</b>	6,6	40,8	5,76	3,2	1,85	0,99	0,14
<b>T2</b>	6,39	76,6	5,28	2,4	10,18	1,98	0,84
<b>T2</b>	6,48	87,5	1,44	7,2	13,88	0,99	1,23
<b>T2</b>	6,79	88,4	2,4	8,8	12,03	0,99	0,93
<b>T3</b>	6,12	47,8	3,84	1,6	4,63	0,00	0,45
<b>T3</b>	6,35	53,6	2,88	4,8	5,55	0,99	0,49
<b>T3</b>	6,51	41,5	1,44	4,8	3,70	0,99	0,38
<b>15-30</b>							
<b>E0</b>	5,71	175,6	2,88	3,2	0,93	0,99	0,09
<b>E0</b>	5,67	183,2	2,88	3,2	1,85	0,99	0,18
<b>E0</b>	5,63	190,8	2,88	3,2	0,93	0,99	0,09
<b>T0</b>	5,96	53,7	4,8	4,8	0,93	0,99	0,07
<b>T0</b>	6,37	58,2	1,92	9,6	1,85	0,99	0,14
<b>T0</b>	6,21	44	3,84	4	1,85	0,99	0,16
<b>T1</b>	6,14	51,5	4,32	5,6	2,78	0,99	0,21
<b>T1</b>	6,34	48,9	2,88	6,4	1,85	0,99	0,15
<b>T1</b>	6,55	55	4,32	8,8	2,78	0,99	0,19
<b>T2</b>	6,03	105,5	4,8	11,2	10,18	1,98	0,64
<b>T2</b>	6,07	106,3	2,4	8	11,11	1,98	0,88
<b>T2</b>	6,24	128,4	4,32	12	12,03	0,99	0,76
<b>T3</b>	5,67	0	2,4	18,4	8,33	8,91	0,48
<b>T3</b>	6,4	70,8	3,84	5,6	4,63	4,95	0,37
<b>T3</b>	6,44	56	1,92	6,4	2,78	2,97	0,25

Annexe 5 : Hauteur d'eau infiltrée en fonction du temps



Hauteur d'eau infiltrée sur le sol de T2 en fonction du temps



Hauteur d'eau infiltrée sur le sol initial en fonction du temps