



**REUTILISATION COMBINEE DES EAUX GRISES ET EXCRETA HUMAINS EN
AGRICULTURE EN MILIEU SAHELIEU**



**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : Eau et Assainissement**

Présenté et soutenu publiquement le 24 Juin 2014 par

Danielle Miranise Sidbéwendé OUEDRAOGO

Travaux dirigés par : **Drissa SANGARE**

Doctorant à 2iE

Boukary SAWADOGO

Ingénieur de recherche à 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Mariam SOU

Membres et correcteurs : Pr. Rabah LAHMAR

Ir. Seyram SOSSOU

M. Drissa SANGARE

Promotion [2013/2014]



REMERCIEMENTS

Je remercie toute l'équipe du projet AMELI-EAUR, particulièrement Dr Mariam SOU/DAKOURE coordonnatrice du dit projet de m'avoir accueilli et de m'avoir permis de réaliser mon mémoire de fin de cycle Master.

Je remercie le directeur du laboratoire LEDES, Pr. Hamma YACOUBA, pour m'avoir permis de réaliser mes travaux dans le laboratoire Eau, Dépollution Ecosystème et Santé.

Je suis particulièrement reconnaissante à mes encadreurs, M. Drissa SANGARE, doctorant à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et M. Boukary SAWADOGO, Ingénieur de recherche à (2iE) pour leur disponibilité et leur engagement pendant ce mémoire.

Je remercie, le Pr. Rabah LAHMAR, M. BOUBE Bassirou pour leur disponibilité et leur aide.

Je remercie le personnel du laboratoire LEDES spécialement M. Sahamaï HEMA, M. Noël TINDOURE, M. Bernard ZONGO et M. Moustapha OUEDRAOGO pour leur assistance.

Je suis profondément reconnaissante à l'égard de mes parents : M. Joachim OUEDRAOGO, Mme Esther OUEDRAOGO pour leur soutien et leur appui, ainsi qu'à ma sœur Patricia et à mes frères Aristide et Kevin.

Je remercie M. Doumassè Innocent ZERBO pour son aide et son appui technique sur le site expérimental, mes camarades Rodrigue KABORE et Florence Gaju Kagabika pour leur collaboration durant ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu lors de ce travail particulièrement mon ami Roland AKAKPO et mes camarades de la promotion master 2 Eau et Assainissement promotion 2013-2014.

RESUME

La réutilisation des sous-produits de l'assainissement écologique (eaux grises traitées, urines hygiénisées et compost à base de fèces humaines) en agriculture se présente de nos jours comme une solution pour pallier aux problèmes de la rareté de l'eau et de l'insécurité alimentaire en Afrique subsaharienne. Cependant, une attention particulière doit être portée sur l'impact des sous-produits de l'assainissement écologique sur le sol et sur les cultures. La présente étude a consisté à évaluer les effets des sous-produits de l'assainissement écologique sur la culture du gombo (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) et sur le sol. Des essais expérimentaux ont été réalisés en plein champs sur le site du projet Améli-Eaur à Kamboinse avec la variété Indiana du gombo. Il y a eu au total 6 types de traitements (Compost+Urine+EB), (Compost+Urine+EGTS), (NPK+EB), (NPK+EGTS), (EB), (EGTS) répétés 3 fois. L'irrigation s'est faite avec les eaux grises de la Station de traitement par Chenal Algal à Haut Rendement (CAHR) et les eaux de barrage qui constitue la principale source d'eau d'irrigation des riverains. Une caractérisation des eaux d'irrigation, des urines, du compost et du sol a été réalisée avant de commencer les cultures. Après culture, les effets de ces différents traitements sur le sol (profondeurs 0-15 et 15-30cm) et les paramètres agronomiques ont été évalués. De cette étude, il ressort que les eaux grises traitées du Chenal Algal à Haut rendement ont un impact positif sur la croissance et le rendement des plantes (0,72T/ha). En ce qui concerne le sol, il n'y a pas de différence significative ($p < 0,05$) entre le pH des sols cultivés et le sol initial. En ce qui concerne le Ratio d'Absorption du Sodium (SAR), certes il n'y a pas de différence significative entre les sols traités et le sol initial, mais des valeurs élevées (12, 10) ont été observées au niveau des sols irrigués avec les eaux grises surtout à la profondeur 0-15 cm. En somme, la réutilisation des sous-produits de l'assainissement est une alternative viable pour garantir la sécurité alimentaire dans les pays en voie de développement.

Mots clés : Agriculture, Chenal Algal, Compost, Eaux grises, SAR, Urine

ABSTRACT

Nowadays, the reuse of product of ecological sanitation (grey treated water, human urine and compost) in agriculture introduces itself like a solution to solve the problems of the lack of water and food insecurity in sub-saharan africa. However, a particular attention must be made to the impact of the product of ecological sanitation to soil and crops. This survey, consist to evaluate the impact of grey water treated, urine and compost with the cultivation of okra (*Abelmoschus esculentus*) and soil. Some experiences have conducted to the experimental site of the project Améli-Eaur with the variety of okra (*Indiana*). There was six treatments (compost+urine+EB), (Compost+Urine+EGTS), (NPK+EB), (NPK+EGTS), (EB), (EGTS) with three repetitions. The irrigation was done with grey water treated from an high efficiency algal pond and dam water that constitutes the mean source of irrigation's water for the market gardener. The soil, grey water, urine and compost were characterized before and after the experimentation. The impact of these different treatments for the soil (depth: 0-15cm and 15-30cm) was determined, and also agronomic parameters. It emerged from this study that the grey treated water from an high efficiency algal pond has a positive impact on the growth and yield plant (0,72T/ha). For soil, there is not a significant difference ($p < 0,05$) between pH of soil treated with grey water and pH of untreated soil. It is the same of SAR, but there is high quantity of SAR (12, 10) at the depth (0-15) cm for soil irrigated with grey treated water. To resume, the reuse of product of sanitation is a good alternative to guarantee the food security in developing countries.

Key words: Agriculture, Algal Chenal, Compost, Grey treated water, SAR, Urine

SIGLES ET ABREVIATIONS

Améli-EAUR : Amélioration de l'accès à l'Eau potable à l'Assainissement milieu Urbain et Rural

SAR : Sodium Absorption Ratio (Coefficient d'absorption du sodium)

NPK : Azote, Phosphore et potassium

EGTS : Eau Grise Traité station

EB : Eau de Barrage

Mg : milligrammes

µS : micro Siemens

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

CAHR : Chenal Algal à Haut Rendement

FAO : Food and Agriculture Organisation (*Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture*)

UFC: Unité Formant Colonies

WHO: World Health Organization

EAA : Eau et Assainissement pour l'Afrique

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
ABSTRACT	iii
SIGLES ET ABREVIATIONS	iv
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
Introduction.....	1
Généralités	4
I. Généralités	5
1.1. Sous-produits de l’assainissement écologique.....	5
1.1.1. Origine et composition des urines humaines.....	5
1.1.2. Origine et composition des fèces humaines.	5
1.1.3. Origines et composition des eaux grises.	6
1.2. Différents systèmes de traitements	7
1.2.1. Urine	7
1.2.1.1. Stockage	7
1.2.1.2. Méthode SODIS.....	7
1.2.2. Eaux grises	8
1.2.2.1. Traitement par bac incliné.....	8
1.2.2.2. Traitement par Chenal Algal à Haut Rendement (CAHR)	8
1.2.3. Fèces humaines	9
1.2.3.1. Compostage.....	9
1.2.3.2. Stockage	10
1.3. Réutilisation des sous-produits de l’assainissement Ecologique	10
1.4. Impacts et risques des sous-produits de l’assainissement écologique	11
1.4.1. Salinité des sols cultivés	11
1.4.2. Impacts des Surfactants des eaux grises sur les sols irrigués.....	12
1.4.3. Impacts sanitaires.....	12
Matériels et méthodes	13
II. Matériels et méthodes	14
2.1. Zone d’étude	14
2.2. Matériel végétal	15
2.3. Dispositif expérimental et traitements	16

2.4. Analyses des eaux d'irrigation et des urines humaines.	18
2.5. Caractérisation du compost	19
2.6. Caractérisation des sols.....	19
2.7. Paramètres agronomiques.....	19
2.8. Analyses Statistiques	20
Résultats et Discussions	21
III. Résultats et Discussions	22
3.1. Caractéristiques des eaux d'irrigation.....	22
3.2. Caractéristiques des urines et du compost à base de fèces humaines.....	23
3.3. Paramètres Agronomiques.....	24
3.3.1. Hauteur de la tige	24
3.3.2 Rendement des récoltes.....	26
3.4. Caractéristiques du sol	28
3.4.1 pH	28
3.4.2 Conductivité Electrique (CE).....	29
3.4.3 SAR.....	30
CONCLUSION	32
BIBLIOGRAPHIE.....	33
ANNEXES.....	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Différentes proportions de nutriments dans les eaux usées domestiques en Suède (Vinneras, 2002).....	7
Figure 2 : Chenal Algal à Haut Rendement (a) et Polytank de stockage des eaux (b)	9
Figure 3 : localisation de la zone d'étude.....	15
Figure 4 : Dispositif expérimental.....	17
Figure 5 : Evolution de la hauteur des tiges durant le cycle de culture.....	25
Figure 6 : Parcelle de plantes de gombo irriguées aux grises traitées du Chenal Algal.....	25
Figure 7 : Rendements des fruits en fonction des différents traitements	27
Figure 8 : Récolte de gombo d'une parcelle irriguée aux eaux grises traitées du Chenal Algal	27
Figure 9 : Valeurs du pH.....	29
Figure 10 : Valeurs de la conductivité électrique (CE)	30
Figure 11 : Valeurs du SAR	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Valeurs des paramètres physico chimiques et biologiques des eaux d'irrigation..	23
Tableau II : valeurs des paramètres physico chimique et microbiologiques des sous- produits de l'assainissement.....	23
Tableau III : Caractéristiques physiques du sol	28

Introduction

Les populations africaines sont en pleine croissance, entraînant une augmentation des besoins alimentaires et également des déchets produits. Cette forte croissance résulte en effet d'un fort taux de natalité surtout en Afrique subsaharienne où celui-ci est le plus élevé au monde (FAO, 2003). La satisfaction des besoins alimentaires de cette population croissante entraîne une augmentation de la production et de la consommation suivie d'une forte pression sur les ressources naturelles et une dégradation de la qualité de vie. Face à ce constat, la gestion durable des ressources naturelles (eaux, sols, végétation etc.) et l'amélioration des conditions de vie deviennent les principaux défis des années à venir.

Pour l'amélioration des conditions de vie des populations africaines, un accent particulier doit être porté à la promotion d'un assainissement durable adapté aux réalités socioéconomiques et basé sur une implication des communautés à la base. En effet, la majorité des 37% de la population mondiale qui n'a pas accès à des services d'assainissement améliorés (UNICEF / OMS, 2012) vit sur le continent africain. L'Afrique est donc le continent le plus touché avec environ 687 millions de personnes qui n'ont toujours pas accès à des installations sanitaires adéquates (EAA, 2014). Cette situation est la cause de nombreuses maladies diarrhéiques qui sévissent dans ces zones précaires où près de 1,8 million de personnes dont 90% d'enfants de moins de 5 ans meurent chaque année (OMS, 2004).

L'assurance d'une meilleure qualité de vie et la promotion du développement durable est également conditionnée par la garantie d'une sécurité alimentaire. C'est ce qui explique les nombreuses politiques adoptées visant l'accroissement de la production et une meilleure répartition des récoltes. Ces efforts se heurtent pourtant à de difficultés de plusieurs ordres. En effet, la plupart des sols de ces pays en particuliers ceux de la zone aride et semi-aride de l'Afrique de l'ouest se caractérisent par leur faible teneur en éléments nutritifs. La fertilité de ces sols s'avère souvent un facteur plus limitatif à la production agricole que la pluviométrie (FAO, 1997). La jachère autrefois utilisée pour permettre la reconstitution naturelle de la fertilité des sols n'est plus applicable dû à une diminution des surfaces arables du fait de la croissance démographique.

L'utilisation de semences améliorées et des engrais chimiques, l'adoption de nouvelles techniques culturales et la production de contre saison sont entre autres des alternatives à l'amélioration de la productivité et la récupération des terres pauvres. Si de façon générale les engrais chimiques sont disponibles pour l'amendement des sols, le faible revenu des agriculteurs est un frein à leur accessibilité. A cela s'ajoute la rareté des ressources en eau qui

contraint les populations sahéliennes à des productions limitées à la saison hivernale ou dans les bas-fonds aménagés.

Ainsi, la valorisation des eaux usées est une réponse à la double problématique de la sécurité alimentaire et de l'assainissement. Cette valorisation se réalise à travers l'assainissement écologique. Un mode d'assainissement de type autonome basé sur la collecte séparée des fèces, des urines et des eaux grises. Cela offre de nombreux avantages pour récupérer et recycler des éléments nutritifs en agriculture, contrôler les micropolluants et agents pathogènes tout en préservant l'environnement (Lopez et al., 2002). En effet, les éléments nutritifs issus de ces biofertilisants sont sous forme ionique et leur absorption par les plantes est plus rapide que ceux des engrais chimiques (Jönsson et al., 2004). Les excréta humains appliqués en cultures maraichères et céréalières ont donné des résultats compétitifs que ceux obtenus avec l'engrais chimique (Kiba, 2005). De plus, les eaux grises contiennent de faibles teneurs en nutriments par rapport aux autres fractions d'eaux usées domestiques, mais leur usage en agriculture réduit fortement les stress hydriques (Mekorot, 2007).

En somme, la réutilisation combinée des sous-produits de l'assainissement en agriculture pourrait être motivée par les points suivants:

- La réduction du péril fécal qui demeure un problème de santé publique en Afrique Subsaharienne ;
- La réduction de l'utilisation d'engrais chimiques en exploitant le pouvoir fertilisant de ces biofertilisants;
- La réduction des pénuries des ressources en eau dans les zones exposées au stress hydrique ;
- L'augmentation du rendement des cultures donc assurance de la sécurité alimentaire

Ces dernières années, l'utilisation des sous-produits de l'assainissement en agriculture a connu une application croissante partout dans le monde, notamment en Israël (Mekorot, 2007), en Suède (Vinnerås, 2002), en Chine (Gao et al., 2002), en Inde (Sridevi et al., 2009) au Japon (Sene et al., 2013) et en Afrique sub-saharienne (Germer et al., 2011).

Malgré tous ces avantages qu'offrent les sous-produits de l'assainissement pour l'agriculture, il existe un risque potentiel pour les sols cultivés, les cultures, les agriculteurs et aussi pour les consommateurs (Travis et al., 2010; Germer et al., 2011). Ainsi, cette présente étude a été initiée pour combler les faibles informations sur la réutilisation combinée des sous-produits de l'assainissement écologique en agriculture en zone sahélienne.

OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif général de notre étude est de contribuer à une valorisation combinée des sous-produits de l'assainissement écologique pour une agriculture durable.

De façon spécifique, il s'agira pour nous de :

- Caractériser les eaux grises, l'urine et le compost à base de fèces humaines ;
- Evaluer les effets combinés des sous-produits de l'assainissement écologique sur la culture du gombo (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) en plein champ ;
- Evaluer l'impact des sous-produits de l'assainissement écologique sur les sols cultivés.

CHAPITRE I

Généralités

I. Généralités

1.1. Sous-produits de l'assainissement écologique

Les sous -produits de l'assainissement sont constitués essentiellement des eaux grises et des excréta humains.

1.1.1. Origine et composition des urines humaines

L'urine est un liquide produit par le corps humain et secrété par le rein par un processus de filtration du sang. C'est un engrais liquide à action rapide bien équilibré, aussi les nutriments contenus dans les urines ont le même effet que les fertilisants industriels (Tanski et al., 2010). Esrey et al. (2001) ont démontré que la plupart des éléments nutritifs contenus dans les excréta humains se retrouve dans les urines, la production annuelle moyenne d'urine par adulte est estimée à 400L contenant 4kg d'azote, 0,4 kg de phosphore et 0,9 kg de potassium. La composition de l'urine varie d'un individu à un autre et d'une région à l'autre. Au Niger, des études réalisées sur l'urine, montrent que l'urine contient en moyenne, 6g/l d'Azote, 0,8g/l de phosphore et 0,9g/l de potassium (Dagerskog and Bonzi, 2010). Karak and Bhattacharyya (2011) ont rapporté une liste impressionnante d'études sur la composition physique, chimique et microbiologique des urines à travers le monde. Le pH de l'urine varie entre 8,9 et 9,20 avec une valeur moyenne de 9 (Akpan-Idiok et al., 2012).

1.1.2. Origine et composition des fèces humaines.

Les fèces humaines sont constituées principalement de matière organique non digérée telles que les fibres provenant du carbone qui confère la couleur brune caractéristique (Featherstone, 1999). L'efficacité agronomique du compost humain comparée au compost animal résulte de la valeur fertilisante élevée du potassium et du phosphore dans le compost humain. Le compost humain augmente le pH du sol et ainsi a le potentiel d'améliorer la croissance des plantes sur les sols acides (Mnkeni et al., 2008). En plus des éléments nutritifs, le compost à base de fèces contient également la matière organique, ce qui peut augmenter la fraction de matière organique du sol et améliorer la structure du sol (Heinonen-Tanski, 2003). Par ailleurs, les fèces peuvent contenir de fortes concentrations de virus pathogènes, les bactéries, les kystes de protozoaires et les œufs d'helminthes (WHO, 2006).

1.1.3. Origines et composition des eaux grises.

Le terme eaux grises est employé pour désigner toutes les eaux produites dans un ménage à l'exception des eaux provenant des toilettes (Morel and Diener, 2006). Les eaux grises proviennent généralement, de la cuisine, de la salle de bain et/ou de la lessive ne contenant en général pas d'excréta en concentrations notables (OMS, 2012). La production des eaux grises est influencée par des facteurs tels que les sources d'approvisionnement en eau existante, le nombre de personnes par ménage, l'âge et le mode de vie (Morel and Diener, 2006). La production journalière au Burkina Faso, en zone rurale dans la région de Ziniaré est de 70 à 147 l/j/concession (Sangare, 2011). Au Mali, elle est de 30l/j/personne et en Israël 98l/j/personne (Morel and Diener, 2006). En outre, Henze et al. (2002) ont montré que la concentration totale en azote des eaux grises est plus faible que dans les eaux usées domestiques, de 0,6 à 74 et 20-80 mg/l, respectivement. Les eaux grises contiennent également des concentrations importantes de matières ayant un impact négatif potentiel sur l'environnement et sur la santé, tels que les sels (Friedler, 2004), les tensioactifs (Wielshafran et al., 2006), les huiles et graisses (Travis et al., 2008), les produits chimiques de synthèse (Eriksson et al., 2002) et contaminants microbiens (Gross et al., 2007). La plage de valeur normale d'une eau d'irrigation est comprise entre 6,5 et 8,5 (Department of Water Affairs and Forestry, 1996).

La figure 1 présente les pourcentages d'éléments nutritifs contenus dans les eaux grises, les fèces et les urines. Les pourcentages d'Azote (N), de Phosphore (P) et de Potassium (K) contenus dans les eaux grises sont respectivement, 10%, 18% et 20%. Ces besoins nutritifs de la plante se retrouvent plus au niveau des fèces et des urines que dans les eaux grises.

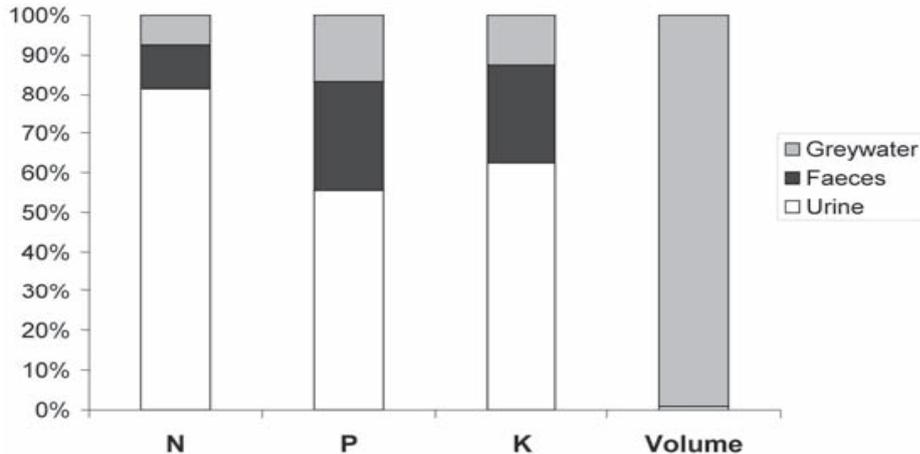


Figure 1 : Différentes proportions de nutriments dans les eaux usées domestiques en Suède (Vinneras, 2002).

1.2. Différents systèmes de traitements

Le traitement efficace des eaux usées domestiques sur place nécessite que les déchets des toilettes doivent être séparés des autres composantes en raison des excréments humains qui contiennent une grande quantité de nutriments (Almeida et al., 1999), de pathogènes, les parasites (Prüss et al., 2002) et les micro polluants(Larsen et al., 2004).

1.2.1. Urine

1.2.1.1. Stockage

L'une des options d'hygiénisation de l'urine est le stockage. Les urines sont généralement stockées dans des bidons ou des réservoirs de 1 m³ pendant une certaine période pour permettre une baisse du taux de bactéries contenues dans les urines. Le stockage de l'urine se fait toujours dans des récipients fermés pour éviter que l'ammoniac ne s'évapore. Le temps de stockage varie de 1 à 6 mois selon le type de culture, de la température et du type d'agents pathogènes à éliminer dans les urines (WHO, 2006).

1.2.1.2. Méthode SODIS

Les urines utilisées pour cette étude ont été hygiénisées par la méthode SODIS (Solar Desinfection). C'est une méthode qui consiste à remplir les bouteilles en verre ou en plastique transparent, puis à exposer ces bouteilles au soleil pendant un certain temps selon l'ensoleillement de la zone. Les températures élevées du soleil contribuent à l'inactivation des germes pathogènes d'où sa grande utilisation dans les pays bénéficiant d'un ensoleillement compris entre 2000 et 3000 W/m²/an comme le Burkina Faso. Cette méthode est généralement réalisée pour la désinfection des eaux.

L'inactivation d'*Eschéricha Coli* comme indicateur de contamination fécale permet d'évaluer l'efficacité du SODIS. Par ailleurs, Berney et al. (2006) ont constaté que cette bactérie est très sensible à l'irradiation solaire et à la température, son absence dans une eau traitée ne témoigne donc pas de l'absence des autres bactéries pathogènes. En réalité, la bactérie *Salmonella Typhimurium*, présente une grande résistance aux irradiations solaires ce qui fait de cette bactérie un meilleur indicateur de suivi (Berney et al., 2006).

A 50°C, le taux d'abattement est de 94% pour les coliformes fécaux, 96% pour les *Eschérichia Coli* et 68% pour les *Salmonella Sp* (Tagro, 2012).

1.2.2. Eaux grises

1.2.2.1. Traitement par bac incliné

Le système de traitement par bac incliné a été conçu pour le traitement des eaux grises dans les ménages à travers une série de deux bacs dans la zone de filtration. Les bacs sont empilés et inclinés d'une pente de 5% afin de faciliter l'écoulement des eaux. Les deux bacs sont superposés et ont une longueur de 3 m au total. Le bac supérieur en plastique d'une longueur de 1m et le bac inférieur en brique d'une longueur de 2m. Le matériau filtrant utilisé est du granite d'une épaisseur variant entre 1 et 9 mm. Les bacs sont remplis de granite à une épaisseur de 10 cm. Le principe de fonctionnement du dispositif est la filtration horizontale sur lit de matériau.

1.2.2.2. Traitement par Chenal Algal à Haut Rendement (CAHR)

La station de traitement par Chenal Algal à Haut Rendement comporte trois unités principales. La bêche de relevage et le bassin décanteur-digesteur constituent la première unité. La lagune du chenal constitue la seconde unité et le bassin de décantation la troisième.

Les eaux grises arrivent de façon gravitaire au niveau de la bêche de relevage sans aucun prétraitement préalable, de là l'eau est pompée vers le bassin décanteur-digesteur. L'alimentation du CAHR se fait à partir du bassin décanteur-digesteur de façon gravitaire. C'est une lagune en forme de crousselle et c'est à l'intérieur de celle-ci que se passe la plus grande partie des mécanismes et réactions visant à épurer l'eau. L'excès de la biomasse algale produite dans le CAHR est recirculé vers le décanteur-digesteur afin d'optimiser les rendements et de favoriser une élimination de l'excès d'algues qui pourrait perturber la symbiose algo-bactérie. Ensuite, l'eau passe de façon gravitaire dans le bassin de décantation. Dans ce bassin, la biomasse algale qui décante est réinjectée par pompage dans la lagune de CAHR. Cette étape a pour principal objectif de favoriser uniquement la croissance des algues qui se décantent facilement dans le chenal, afin de faciliter leur élimination après le

traitement. A ce niveau, il y a une décantation des boues (algues) et le surnageant (eau traitée) coule de façon gravitaire vers un bassin collecteur d'où elle est pompée et stockée dans un polytank pour la réutilisation en agriculture.



(a)



(b)

Figure 2 : Chenal Algal à Haut Rendement (a) et Polytank de stockage des eaux (b)

1.2.3. Fèces humaines

Les matières fécales fraîches doivent toujours être considérées comme dangereuses en raison du risque de présence de concentrations élevées d'agents pathogènes (WHO, 2006). Ainsi, elles doivent toujours être désinfectées ou traitées. Les principaux processus de traitement sont entre autres le stockage, le compostage, l'incinération et le traitement chimique (Niwagaba, 2009).

1.2.3.1. Compostage

Le processus de compostage est généralement appliqué au traitement sur place des fèces humaines séparées de l'urine (Vinnerås and Jönsson, 2002). En effet, la toilette à compost est une technologie à faible coût (Ushijima et al., 2011) qui permet le traitement sur place des fèces humaines séparées de l'urine présentant de nombreux avantages du point de vue de préservation des ressources en eau et le recyclage des nutriments (Tonner-Klank et al., 2007). En outre, le compostage des fèces pour obtenir des engrais organiques a été initié pour réduire efficacement les pathogènes et les problèmes des odeurs (Sossou et al., 2013).

1.2.3.2. Stockage

Le stockage dans un état sec à température ambiante ou accrue est un traitement secondaire des fèces. Les conditions dans lesquelles le nombre des agents pathogènes diminue au cours du stockage dépendent des facteurs tels que le pH, l'humidité, la température, la disponibilité des nutriments, de l'oxygène la disponibilité, la concentration de l'ammoniac et l'exposition aux UV (Winker et al., 2009). Ainsi, le stockage à basse température prolonge le temps nécessaire pour réaliser l'hygiénisation suffisante des matières fécales. De plus, le maintien du niveau d'humidité bas, <20% pendant tout le stockage, entraîne la faible dégradation ainsi que les pertes d'Azote et de produits organiques.

1.3. Réutilisation des sous-produits de l'assainissement Ecologique

La récupération et l'utilisation des eaux usées et excréta en agriculture ont été pratiquées sur des millénaires par presque toutes les cultures à travers le monde (Muskolus, 2008). En effet, l'urine humaine est une source précieuse de différents nutriments qui a été utilisée depuis l'antiquité pour améliorer la croissance des plantes, notamment les légumes à feuilles et est universellement disponible à faible coût (Jönsson et al., 2004). Kirchmann and Pettersson (1995) ont été les premiers à l'utiliser comme engrais au cours des expériences scientifiques. Lentement mais sûrement, la valeur fertilisante de l'urine humaine a reçu une plus grande attention de plusieurs chercheurs au cours de ces dernières décennies (Morgan, 2003; Jönsson et al., 2004; Mnkeni et al., 2008; Sene *et al.*, 2012). Par ailleurs, des essais en pots ont été réalisés en Afrique du Sud où l'utilisation de l'urine humaine sur le chou, les épinards, le maïs et la tomate a été étudiée (Mnkeni et al., 2006). Les essais réalisés au Zimbabwe ont montré une augmentation des rendements des légumes et maïs cultivés sur des sols sableux à la suite de l'apport des urines comme engrais liquide (Morgan, 2003). Le test d'urine réalisé sur des pots d'épinard à l'université d'Hokkaido au Japon a permis de montrer que l'application de l'urine à intervalle régulier pourrait être une meilleure façon de promouvoir la croissance des plantes (Sene et al., 2012). De plus, une expérience réalisée au Ghana conclu que l'application combinée de l'urine TSP (Triple Superphosphate) et KCl (Chlorure de potassium) peut se substituer totalement aux engrais composés NPK (Germer et al., 2011). En Finlande, l'urine humaine a été utilisée dans des essais comme engrais dans la culture des choux en comparaison avec des traitements aux engrais industriels et des traitements sans fertilisants (Pradhan et al., 2007). L'urine humaine obtenue à partir de toilettes à séparation a été testée

comme engrais dans la culture de concombre de plein air dans un climat nordique (Heinonen-Tanski et al., 2007).

En ce qui concerne les fèces humaines, elles ont des teneurs élevées en phosphore et en potassium sous forme ionique, mais l'azote est libéré lentement car il reste organiquement lié aux aliments non digérés (Kirchmann and Pettersson, 1995). Une excellente revue effectuée par Heinonen-Tanski et van Wijk-Sijbesma (2005) a évalué l'utilisation des excréments humains pour la production agricole.

Enfin, quant aux eaux grises, Al-Hamaiedeh and Bino, (2010) ont évoqué l'importance de leur réutilisation en agriculture en zone aride où l'eau est rare et pourrait réduire l'utilisation de l'eau potable de 50%. De plus, les nutriments contenus dans les eaux grises pourraient augmenter la croissance des plantes (Kiziloglu et al., 2008). Toutefois, les eaux grises de lessive contiennent une grande proportion de sels et de sodium qui augmente la conductivité électrique du sol (Misra and Sivongxay, 2009). Aussi l'irrigation à long terme avec les eaux grises de lessive pourrait rendre les sols hydrophobes et augmenter ainsi la pollution environnementale (Anwar, 2012).

1.4. Impacts et risques des sous-produits de l'assainissement écologique

1.4.1. Salinité des sols cultivés

Une étude réalisée en Afrique du Sud par Mnkeni et al. (2005) a révélé que dans cette zone des taux d'application très élevés d'urine réduisaient les rendements. Ceci s'expliquait par la salinité accrue des sols et donc des niveaux élevés de sodium dans les tissus végétaux. Cependant, les taux d'application de N dans l'étude étaient extrêmes: 1600 kg N / ha, ce qui augmenta la conductivité électrique du sol, résultant en une classification du sol comme un sol très fortement salin après la récolte. De même les eaux grises utilisées en irrigation pourraient être à l'origine de la salinisation des sols.

L'irrigation avec des eaux grises pourrait défavorablement influencer sur la productivité des sols sur une longue période due au niveau élevé de Sodium, de Zinc et d'Aluminium, et aussi à la valeur élevée du SAR et de l'alcalinité excessive (Christova-Boal et al., 1996) et (Wiel-shafran et al., 2006). Aussi une telle irrigation causerait des effets directs sur la chimie du sol tels que l'élévation du pH et de la salinité (Roesner et al., 1994).

1.4.2. Impacts des Surfactants des eaux grises sur les sols irrigués

Les eaux grises peuvent avoir plusieurs impacts sur le sol, les plantes et les hommes (utilisateurs et consommateurs). L'irrigation avec un traitement suffisant des eaux grises riche en surfactants pourrait amener le sol à prendre des propriétés hydrophobes (Wiel-shafran et al., 2006).

1.4.3. Impacts sanitaires

Les indicateurs fécaux tels que les coliformes totaux, *Eschéricha Coli*, clostridia et les streptocoques fécaux ont été trouvés de diverses quantités dans les réservoirs utilisés comme source de séparation d'urine (Höglund et al., 1998). *Eschéricha Coli* était très rarement trouvé tandis que les streptocoques fécaux y étaient à une valeur équivalente 100% de matières fécales (Geldreich, 1978).

Les caractéristiques microbiologiques des eaux grises ménagères ont fait l'objet de nombreuses études récentes (Birks et al., 2007, Ottosson, 2003) parce qu'ils pourraient être l'origine de maladies pour les hommes. Plusieurs études, contrairement aux suppositions que les eaux grises sont sans dangers dues au fait qu'il n'y a pas de matières fécales dans ces eaux, ont trouvé des coliformes totaux et fécaux presque égal à ceux trouvés dans des eaux usées (Ottosson, 2003, Rose et al., 1991). En Israël, Friedler (2004) a trouvé que les eaux grises contiennent 4.10^6 (CFU/100ml) de coliformes fécaux qui pourraient avoir des effets négatifs sur la santé des agriculteurs et sur les cultures irriguées.

CHAPITRE II

Matériels et méthodes

II. Matériels et méthodes

2.1. Zone d'étude

Le site expérimental du projet Améli-EAUR situé au sein de la Fondation 2iE Kamboinsé (12°27'40,6''N, 01°32'56,0''W) a servi de cadre pour la réalisation de cette étude (Figure 4). En effet, le village de Kamboinse est situé à 15 km de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso) sur l'axe Ouagadougou – Koungoussi et majoritairement peuplé de Mossi.

Ce village qui fait partie intégrante de la commune de Ouagadougou précisément dans l'arrondissement 9, est situé dans la zone soudano-sahélienne, et jouit d'un climat tropical avec deux principales saisons à savoir :

- une saison pluvieuse qui s'étend de Juin à Septembre et marquée par des vents humides de la mousson ; une saison sèche plus longue, qui va d'Octobre à Mai et dominée par les vents d'harmattan.

La pluviométrie annuelle est d'environ 800 mm avec les mois de juillet et d'août qui enregistrent les plus grandes quantités d'eau (Station météo de Kamboinse).

La végétation de Kamboinse est dominée par une savane arbustive claire parsemée de quelques arbres et une strate herbacée (Adoum, 2011). Les sols rencontrés dans cette localité sont 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.

Les principales activités pratiquées sont l'agriculture en saison pluvieuse, les cultures maraîchères et l'élevage en saison sèche.

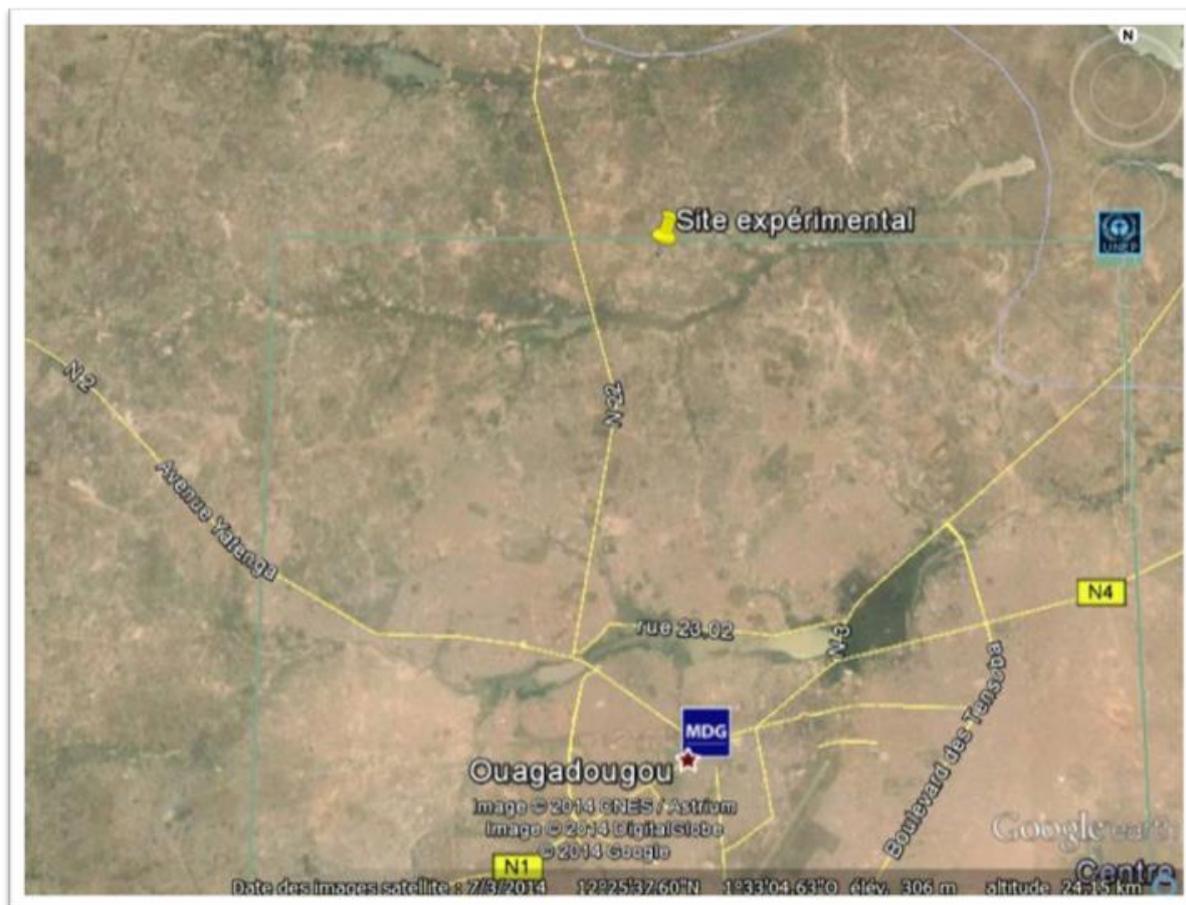


Figure 3 : localisation de la Zone d'étude

2.2. Matériel végétal

La variété indiana du gombo (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) a été utilisée dans le cadre de cette étude. Plusieurs raisons justifient le choix de cette culture.

Le gombo est bien adapté aux climats chauds et humides (climat caractéristique de la zone). Cependant il est sensible à la sécheresse, mais cette sensibilité varie suivant les phases de son cycle de développement.

Sawadogo et al. (2006) (sawadogo et al., 2006) ont montré que l'effet du stress hydrique en phase de boutonnisation est très néfaste pour le gombo et se manifeste par une baisse des composantes du rendement.

Compte tenu, du temps relativement court pour faire l'étude, nous avons choisi une variété à cycle court.

Cette variété, nous permettrait d'avoir des fruits au bout 45 à 55 jours. En effet, les premiers fruits peuvent apparaître 41 jours après le semis et la première récolte peut se faire 45 jours après semis. Notons tout de même que cette variété est bien prisée par les producteurs de la

ville de Ouagadougou et de ses environs (Sawadogo et al., 2009). La culture du gombo n'est pas exigeante en eau. En climat sahélien, les besoins en eau du gombo au cours d'un cycle cultural complet sont de l'ordre de 780 à 1000 mm.

Généralement, le gombo tolère une grande diversité de sols. Cependant, il préfère les sols limono-sableux, bien drainés et riches en matières organiques avec un pH compris entre 6 et 7 (Akpan-Idiok et al., 2012). Enfin, il faut noter que cette plante est modérément tolérante à la salinité (Ünlükara et al., 2008).

2.3. Dispositif expérimental et traitements

Les expérimentations relatives au pouvoir fertilisant des sous-produits de l'assainissement écologique ont été conduites depuis le 14 mars 2014 sur une série de parcelles disposées sur le site expérimental évoqué plus haut.

Les graines de gombo sont semées dans des parcelles élémentaires de 1,56m² à raison de 4 graines par poquet pour 6 poquets par parcelle. Six différents traitements ont été appliqués. Les six (6) traitements ont été disposés en blocs aléatoires et répliqués trois (3) fois (figure 4). Ainsi, nous avons au total 18 parcelles de 1,56 m² chacune avec un intervalle de 0,5m. Les traitements ont été basés sur le besoin en azote de la plante du Gombo qui est de 100kg/ha (Grubben et al., 2004). Les proportions de 75% azote provenant des urines et 25% azote provenant du compost à base de fèces humaines ont été appliquées. Ces proportions ont été choisies sur la base d'une étude antérieure effectuée par Sangaré et al (2013). Ces ratios donnaient de meilleurs rendements pour la culture du gombo.

Les différents traitements appliqués se présentent comme suit :

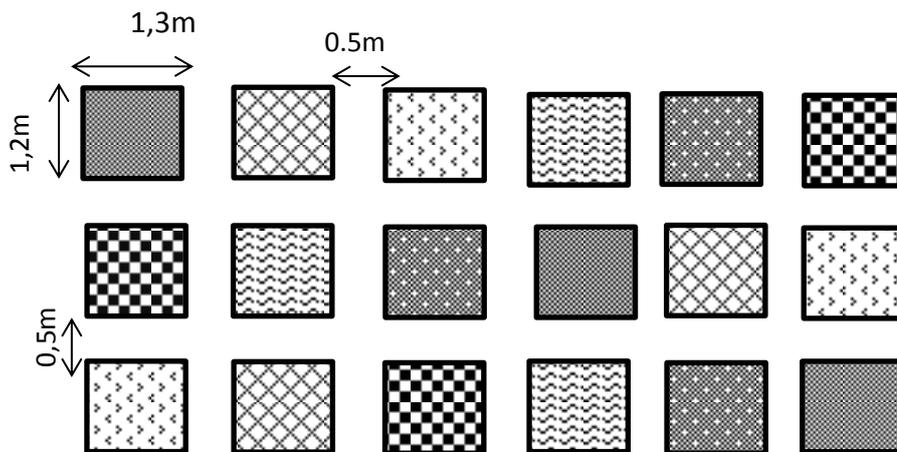
- (1) Eau de Barrage
- (2) Eaux grises
- (3) Eaux Barrage+NPK
- (4) Eaux grises+NPK
- (5) Eaux Barrage+ 75%N_urine+25%N_compost
- (6) Eaux grises+75%N_urine+25%N_compost

L'urine a été appliquée deux semaines après le semis, à raison de 250 ml, par poquet ce qui est équivalent à 9615,38l /ha. Une deuxième application a été faite trois semaines après la première application et une autre, trois semaines après la deuxième application. Pour appliquer les urines un sillon de 5-10 cm de profondeur a été faite autour de la plante.

L'engrais NPK 14:23:14 a été appliqué à la dose de 0,147 t /ha (23 g / parcelle) par la méthode de l'anneau. En ce qui concerne le compost à base de fèces humaines, l'apport a été fait une seule fois et ce en début de culture, avec une quantité de 70g/parcelle équivalent à 4,44 t/ha. Les besoins en eau ont été estimés à partir du logiciel CROPWAT8.0 (voir annexe 1).

Les parcelles ont été désherbées manuellement 3 fois durant la période de culture et périodiquement traitées avec les insecticides (K-Lambda et Pacha) pour lutter contre les insectes, les nématodes et les champignons ravageurs.

La figure 4 ci-dessous présente le dispositif expérimental



Légende :

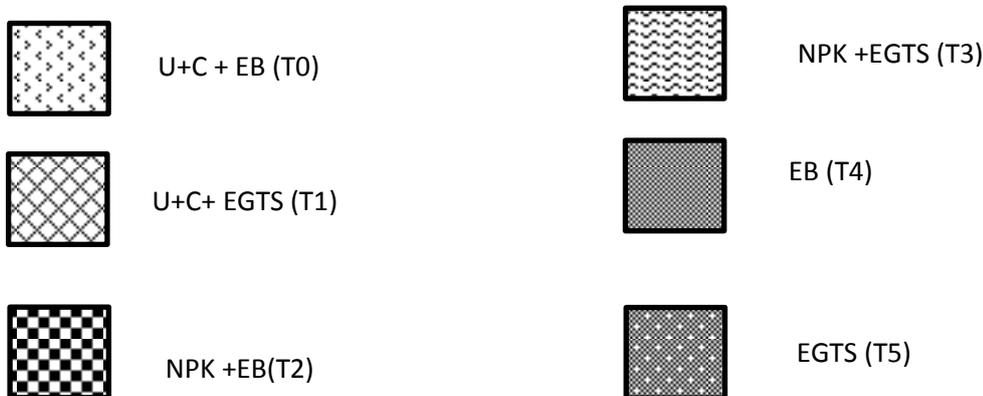


Figure 4 : Dispositif expérimental

2.4. Analyses des eaux d'irrigation et des urines humaines.

Les prélèvements ont été réalisés sur le site expérimental au niveau de polytank où ont été stockées les eaux grises traitées provenant de la station de traitement chenal algal (EGTS) et des eaux du barrage (EB) de Kamboinsé. Les urines hygiénisées provenant des familles pilotes sont aussi prélevées sur le site où elles sont stockées.

Pour les eaux et les urines, les échantillons pour les analyses physico chimiques ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 1l et les échantillons pour les analyses microbiologiques dans des flacons en verres stérilisés de 500 ml. Les échantillons ont été conservés dans des glacières avec des accumulateurs de froid afin de maintenir la température à 4° C.

Les prélèvements des eaux d'irrigation ont été réalisés chaque fois qu'on renouvelle le stock des différents polytanks de stockage, ceci visait à évaluer la variabilité temporelle de la qualité des eaux d'irrigation.

Pour les sous-produits, le pH, la conductivité électrique, et l'oxygène dissous ont été mesurés in situ respectivement par pH mètre WTW pH 3310, un conductimètre WTW multi 350 i et un oxymètre DO 200 Ecosense après calibration avec des solutions tampons. La demande biochimique en oxygène (DBO₅) et la demande chimique en oxygène (DCO) des eaux d'irrigation ont été déterminées respectivement par la méthode manométrique après incubation, avec un DBO mètre de type Oxytop et par la méthode de minéralisation en milieu acide avec du dichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) suivi d'une lecture au spectrophotomètre DR 2000.

Les matières en suspension des eaux d'irrigation ont été déterminées à l'aide de la méthode de filtration sur membrane GFC. La concentration des matières en suspension a été calculée pour les eaux par la formule suivante :

$$MES = \frac{M_1 - M_0}{V} \times 1000 \quad (1)$$

MES : Matières en suspension

M₀ : Masse de la membrane à vide (mg)

M₁ : Masse de la membrane après filtration (mg)

V : Volume d'eau utilisée (ml)

Les nutriments des deux sous-produits à savoir l'ammonium (NH₄⁺), les nitrates (NO₃⁻), les nitrites (NO₂⁻) et les ortho phosphates (PO₄³⁻) ont été mesurés par la méthode Hach. Les ions

calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), carbonates (CO_3^{2-}), hydrogénocarbonate, hydroxyde (OH^-) et les ions chlorures (Cl^-) ont été déterminés par volumétrie.

Pour évaluer le risque de salinisation et de sodisation des sols, la classification de la qualité des eaux d'irrigation et des urines, selon Richards (1954) a été utilisée. Cette évaluation est fondée sur la conductivité électrique (CE) et le ratio d'adsorption du sodium (SAR). Les valeurs du (SAR) ont été calculées comme suit :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Mg}^{2+} \times \text{Ca}^{2+}}{2}}} \quad (2)$$

Où les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ sont mesurés en méq/l.

2.5. Caractérisation du compost

En ce qui concerne le compost fait à base d'excrétas humains, les échantillons ont été prélevés sur le site au niveau de stocks provenant de familles pilotes dans des sacs en plastique. Le pH et la conductivité ont été déterminés à partir d'un pH mètre WTW pH 3310 et d'un conductimètre. Les ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), carbonates (CO_3^{2-}), hydrogénocarbonate, hydroxyde (OH^-) et les ions chlorures (Cl^-) ont été déterminés par volumétrie. Le phosphore total et l'azote total ont été déterminés par la méthode Hach et la méthode kjedhal respectivement. La valeur du SAR a été également déterminée.

2.6. Caractérisation des sols

Les échantillons sol ont été prélevés sur le site expérimental dans les parcelles de culture avant le semis et après la récolte, entre les plants et sous les plants. Des échantillons composites ont été réalisés avec ces prélèvements pour les analyses.

Les échantillons sont prélevés de deux horizons différents, 0-15 cm et 15-30 cm, au moyen d'une tarière. Ils sont conservés dans des sacs en plastique.

La perméabilité du sol, la granulométrie ainsi que le poids volumique apparent ont été déterminés sur le site. Le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés par un multi paramètre analyseur de type 350i sur un extrait aqueux obtenu du mélange du sol et de l'eau distillée selon un rapport de 1:2,5 et 1:5 respectivement. Ici également, le SAR a été évalué pour chaque traitement.

2.7. Paramètres agronomiques

Pour déterminer les paramètres agronomiques, la hauteur des tiges a été mesurée à l'aide d'une règle et le nombre de feuille a été compté une fois par semaine à partir du 21^{ème} jour après semis (JAS). La récolte des fruits s'est faite chaque semaine à compter du 48^{ème}

jusqu'au 69^{ème} jour. Le nombre de fruits, ainsi que le poids frais ont été déterminés respectivement par comptage et à l'aide d'une balance au laboratoire.

2.8. Analyses Statistiques

Les données ont fait l'objet d'une analyse de variance (ANOVA) réalisée avec le logiciel R. L'appréciation des différences entre les moyennes a été réalisée avec les tests de Kruskal Wallis et Tukey HDS (Honestly Significant Difference), avec un intervalle de confiance à 95 %. Les graphiques ont été réalisés avec le logiciel excel.

CHAPITRE III

Résultats et Discussions

III. Résultats et Discussions

3.1. Caractéristiques des eaux d'irrigation.

Les différents paramètres physico-chimiques des eaux utilisées pour l'irrigation ont été mesurés et présentés dans le tableau I ci-dessous. La valeur du pH des eaux grises traitées station (EGTS) et celui des eaux de barrage (EB) est de 7,34 et 7,54 respectivement. Ces valeurs se situent dans la plage de valeur normale fixée par le department of water affairs and forestry (1996). Par ailleurs, il faut noter que les EGTS se caractérisent par une conductivité électrique élevée (497,5 μ S/cm) contrairement à celle des EB (189,7 μ S/cm). Cette valeur de CE importante a pour origines les sels qui se retrouvent dans les eaux grises. Cependant, notre valeur est largement en deçà de celle trouvée en Jordanie (4500 μ S/cm) par Li et al. (2008) et respecte la valeur limite (< 3000 μ S/cm) de l'OMS (2006). En somme, les paramètres physiques (pH et CE) des deux différents types d'eaux d'irrigation sont en accord avec les recommandations de la FAO (Pescod, 1992).

La valeur du SAR dans les EGTS est de 3,7 et de 0,3 dans les EB, ces valeurs sont faibles et cela pourrait s'expliquer par les faibles teneurs en sodium trouvées dans ces eaux. Par ailleurs, cette valeur élevée de SAR des EGTS (3,7) par rapport à celle des EB pourrait s'expliquer par l'emploi de savon et de détergent lors des lessives dans les ménages (Gross et al., 2005). D'après des études menées sur les effets du SAR, un usage continu d'eau grise avec un SAR élevé supérieure à 15 provoquerait une déstructuration du sol et limiterait son aération et sa perméabilité (Wielshafran et al., 2006). La valeur du phosphore total dans les EGTS est de 11,9 mg/l et est plus élevée que celle trouvée dans les EB qui est de 2,8 mg/l. En ce qui concerne l'Azote total, les valeurs trouvées sont respectivement de 15,9 mg/l et de 0,84 mg/l. Il est évident qu'une irrigation à partir des EGTS contribuerait à apporter des éléments nutritifs aux plantes (Vinnerås, 2002) contrairement aux EB. Les surfactants n'ont pas été trouvés dans les EB, la valeur trouvée dans les eaux grises est de 1,8 mg/l. Cette présence de surfactant proviendrait probablement des détergents utilisés lors des lessives et vaisselles (Shafran et al., 2005). D'après des études menées par Wiel-shafran et al. (2006), l'irrigation avec un traitement insuffisant des eaux grises riches en surfactants pourrait amener le sol à prendre des propriétés hydrophobes. En ce qui concerne les matières organiques, la DBO dans les EGST est plus élevée que dans les EB, cela est dû au fait que ces eaux proviennent de la cuisine, de la salle de bain ou de la lessive (OMS, 2012) où sont utilisées généralement les huiles et les détergents.

Tableau I : Valeurs des paramètres physico chimiques et microbiologiques des eaux d'irrigation

Paramètres	EB	EGTS
pH	7,54	7,34
CE ($\mu\text{S/cm}$)	189,7	497,5
Azote Total (mg/l)	0,84	15,9
Phosphore total (mg/l)	2,8	11,9
Potassium (mg/l)	11,5	23,1
Sodium (mg/l)	6,4	70,3
Calcium (mg/l)	20,4	19,8
Magnésium (mg/l)	4	4,4
Chlorure (mg/l)	3,15	19,6
Surfactants (mg/l)	-	1,8
SAR	0,3	3,7
NH_4^+ (mg/l)	0,78	5,8
NO_3^- (mg/l)	-	7,5

3.2. Caractéristiques des urines et du compost à base de fèces humaines

Le tableau II ci-dessous présente les paramètres physico chimique des urines et du compost à base de fèces humaines. Le pH moyen de l'urine est de 8,1 cette valeur se situe dans l'intervalle trouvé par Akpan-Idiok et al. (2012). Selon Esrey et al. (2001), la plupart des éléments nutritifs contenus dans les excréta humains se trouvent dans les urines. Aussi, les analyses effectuées révèlent que l'azote total, le phosphore total et le potassium se retrouvent dans les urines à des proportions plus grandes que dans le compost. Par exemples les résultats trouvés par Dagerskog et Bonzi (2010) au Niger sur la composition des urines sont différents des résultats présenté dans le tableau II ci-dessous.

Tableau II : valeurs des paramètres physico-chimiques et microbiologiques des urines et du compost

Paramètres	Urine	Compost
pH	8,1	
EC	21(mS/cm)	8,35(mS/cm)
Azote total	2,7(g/l)	54,7(mg/kg)
Phosphore total	0,042(g/l)	194(mg/kg)
Potassium	3 ,2(g/l)	1848(mg/kg)
Sodium	2,8(g/l)	565(mg/kg)
Calcium	0,06(g/l)	160(mg/kg)
Magnésium	0,05(g/l)	96(mg/kg)
Chlorure	2,6(g/l)	497(mg/kg)
SAR	64,2	10,9

3.3. Paramètres Agronomiques

La hauteur de la tige, le poids des fruits en fonction du type de traitement, nous permet de juger l'impact de chaque type de traitement sur la culture du gombo.

3.3.1. Hauteur de la tige

La hauteur de la plante est un élément très important dans la détermination de la croissance de la plante. La figure 6 présente la croissance des plantes durant le cycle de culture suivant les différents traitements appliqués. De façon générale, il faut noter que la croissance est lente et homogène du 21^{ème} au 35^{ème} Jour Après Semis (JAS) pour tous les traitements. A partir du 35^{ème} JAS, trois tendances de croissance se dégagent à savoir (T1, T5) ; (T0, T3) et (T2, T4). En effet, les plantes irriguées avec les EGTS (T1 et T5) montrent une croissance relativement importante comparativement à celles irriguées avec les EB (T2 et T4)). De plus, les plantes irriguées uniquement avec les EGTS présentent la meilleure croissance que celles du traitement T1 (U+C+EGTS) et même de T3 (NPK+EGTS). Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que les nutriments contenus dans les EGTS sont suffisants pour les besoins essentiels des plantes. Cependant, les faibles croissances sont signalées pour les plantes irriguées avec les EB. Même, l'apport de nutriments par les excréta humains et l'engrais chimique NPK à ces EB n'influence pas la croissance des plantes de ces traitements. Les EB utilisées par les riverains de Kamboinsé auraient des effets nocifs (exemples présence des métaux lourds) pour les cultures.

Les résultats obtenus montrent que les EGTS pourraient être utilisées par les maraîchers en substitution aux EB. De plus en utilisant les EGTS, il n'y a pas besoin d'ajout d'engrais chimique ou biologique.

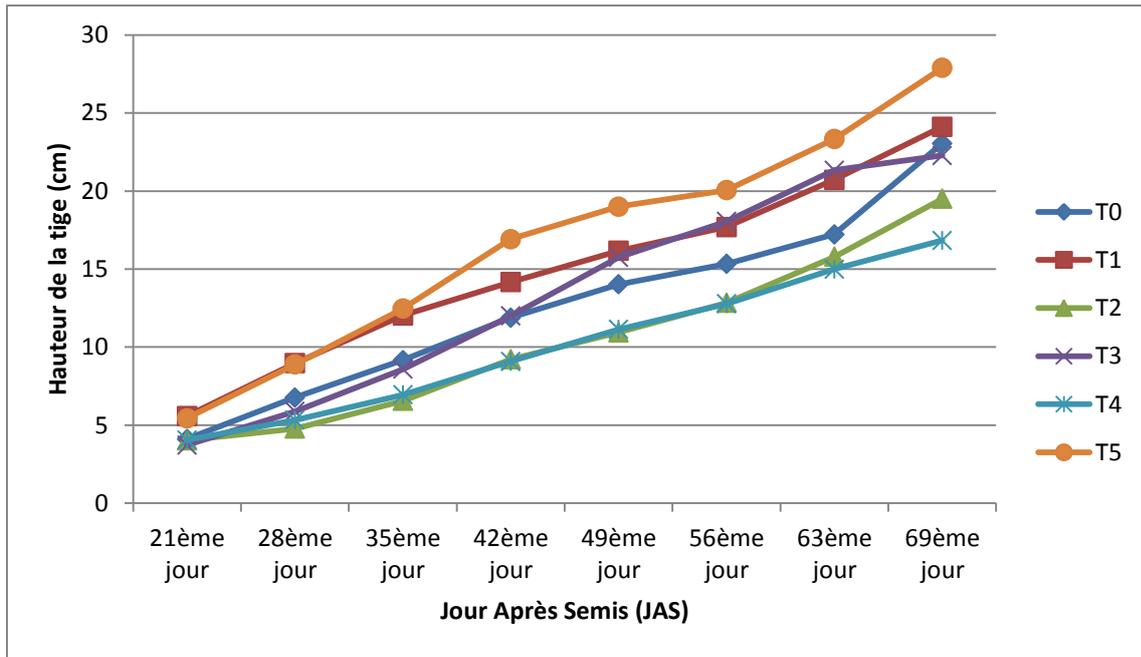


Figure 5 : Evolution de la hauteur des tiges durant le cycle de culture



Figure 6 : parcelle de plantes de gombo irriguées aux grises traitées du Chenal Algal

3.3.2 Rendement des récoltes

Durant le cycle végétatif, 4 récoltes ont été effectuées au 48^{ème}, 54^{ème}, 62^{ème} et 69^{ème} JAS. Les résultats à travers la figure 7 indiquent qu'il y a une différence significative ($<0,05$) entre les différents traitements. En effet, le traitement avec EGTS uniquement (T5) donne une production de fruit (0,72 T/ha) significativement supérieure ($p<0,05$) à celle de T2 (0,2 T/ha), T3 (0,27 T/ha) et T4 (0,25T/ha). Ces résultats confirment ceux précédemment présentés à la figure 6. En effet, la hauteur optimale de la plante de Gombo est positivement corrélée à sa productivité selon Saeed et al. (2001). Cette production significative des fruits de gombo avec les EGTS peut être attribuée à l'approvisionnement en eau et en éléments nutritifs mais principalement en raison des éléments nutritifs qui sont fournis et libérés de façon continue. Des résultats similaires ont été obtenus par Akponikpè et al. (2011) sur les tomates et aubergines irriguées avec les eaux de barrages de Loumbila et les eaux usées domestiques traitées de la station de ZiE. En effet, ils ont montré que les cultures donnaient de meilleurs rendements avec les eaux usées domestiques traitées comparativement à celles irriguées avec les eaux du barrage.

Ici également, les traitements avec les EB donnent de faibles rendements comme pour la croissance. En effet, les plus faibles rendements sont obtenus avec les EB uniquement (T4) avec une production de (0,25T/ha) suivi de T2 (0,20T/ha). Par ailleurs, même avec l'apport des excréta humains et des engrais chimiques (NPK), les rendements restent inférieurs à ceux des eaux grises. Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par Sou (2009) qui avait montré qu'un ajout d'engrais aux eaux usées traitées est inefficace, voire contre-productif pour les plantes.

Ces résultats pourraient s'expliquer d'une part par le fait que l'apport de l'azote par l'urine et les NPK sont soumis à une volatilisation en raison de la forte évaporation. En effet, Mermoud et al. (2005) ont montré dans les études de la dynamique des nitrates de la zone Kamboinsé que la forte évaporation de la région conduit à une hypertension volatilisation de l'azote. Ceci entraînerait un déficit en besoin d'azote pour la plante. Par contre avec les eaux grises riches en éléments nutritifs, l'apport est continu et régulier et les pertes sont compensées.

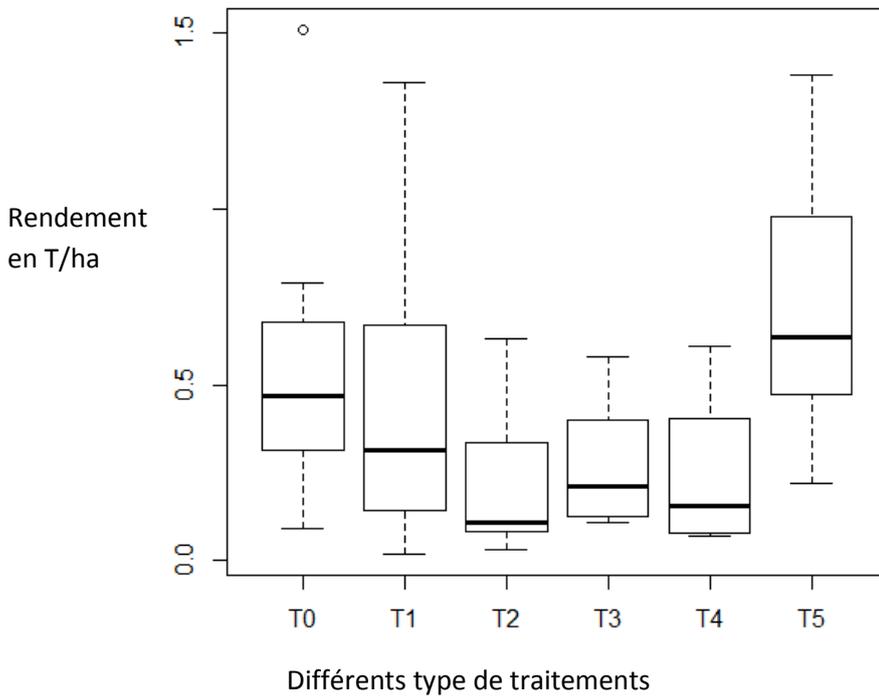


Figure 7 : Rendements des fruits en fonction des différents traitements



Figure 8 : Récolte de gombo d'une parcelle irriguée aux eaux grises traitées du Chenal Algal

3.4. Caractéristiques du sol

Le tableau III ci-dessous présente les différents paramètres physiques du sol. La texture du sol a été déterminée à partir du triangle international des textures. De cette caractérisation du sol, il ressort que le sol est de texture sablo-argilo-limoneuse à la profondeur (0-15) cm et limono-argilo-sableux à la profondeur (15-30) cm. Plusieurs analyses ont été réalisées sur le sol avant et après culture afin de déterminer les effets des différents traitements sur le sol. Les éléments qui affectent le plus le sol sont entre autres le pH, l'Electro conductivité et le SAR.

Tableau III : Caractéristiques physiques du sol

Caractéristiques physiques	Profondeurs	
	0-15 cm	15-30 cm
Sable grossier %	35	22
Sable fin %	23	26
Limon %	23	29
Argile %	19	23
Masse volumique apparente (kg/l)	1,4	1,2

3.4.1 pH

La figure 9 (a et b) présente les valeurs de pH obtenues au niveau des profondeurs (0-15cm) et (15-30cm) après les différents traitements. Le pH eau (extrait 1:2,5) du sol initial des profondeurs 0-15cm et 15-30cm se situe autour de 5,30 et 5,7 respectivement. Dans l'ensemble, il n'y a pas de différence significative ($p < 0,05$) entre les valeurs du pH des différents traitements et celui du sol initial (5,3) à la profondeur (0-15cm) à l'exception de celle de T5 (6,3). Cette faible variation des valeurs de pH de T0 (U+C+EB) et T1 (U+C+EGS) est contraire aux résultats des études de Mnkeni et al. (2008). En effet, selon ces auteurs, l'emploi de l'urine entrainerait une diminution du pH due probablement à la nitrification de l'ammoniac, en produisant des ions H^+ provenant des urines. Cependant, l'augmentation du pH au niveau de T5 (EGTS) proviendrait de la matière organique issue des eaux grises du chenal algal. En effet, Al-Hamaiedeh and Bino (2010) ont montré que l'irrigation des sols cultivés avec les eaux grises augmente de façon continue la matière organique de ces sols.

Par ailleurs, il n'y a pas de différence significative ($p < 0,05$) entre les valeurs de pH des sols irrigués et celle du sol avant culture pour la profondeur (15-30cm) illustrée à la figure 9b.

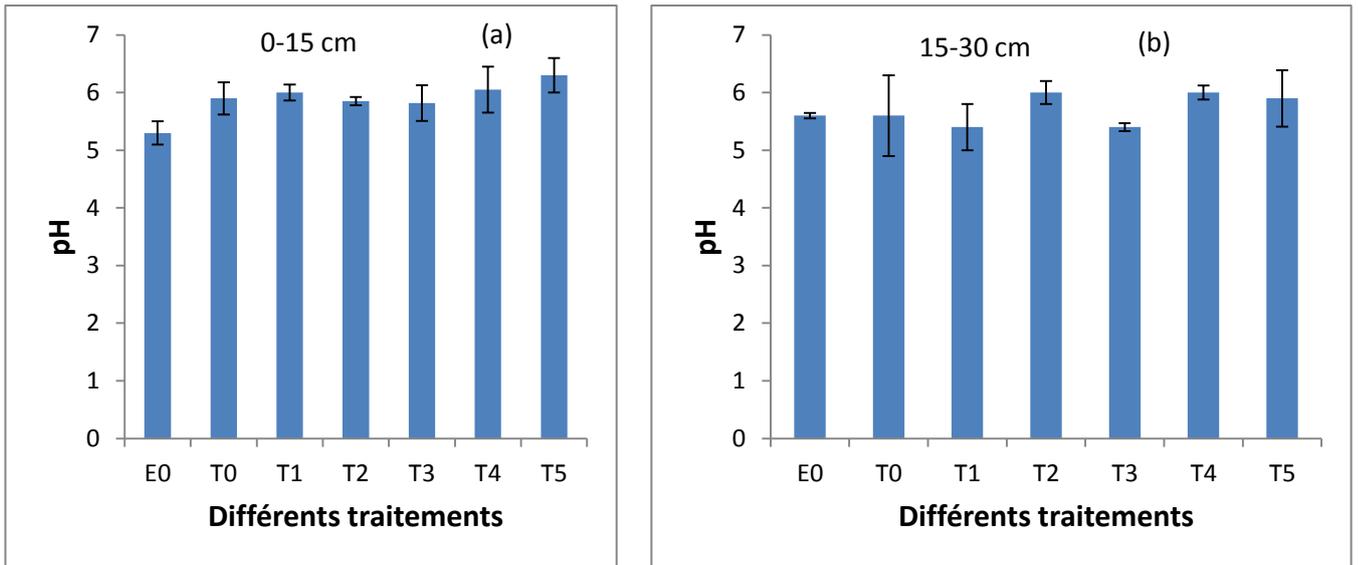


Figure 9 : Valeurs du pH

3.4.2 Conductivité Electrique (CE)

La figure 10 a et b montre la variation de la conductivité électrique (CE) des sols cultivés et sol initial aux différentes profondeurs 0-15cm et 15-30cm. A l'état initial, la CE était de 252,3 et 171,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement aux profondeurs 0-15 et 15-30 cm. Nous observons que les valeurs de CE sont décroissantes en allant en profondeur. Ces résultats confirment ceux de Ben-Hur (2005) qui a signalé que dans un sol sablo-argilo-limoneux, les sels se trouvent pour l'essentiel dans les 20 premiers centimètres.

A la profondeur (0-15cm), l'analyse de la variance indique qu'il y a une différence significative ($p < 0,05$) entre les sols irrigués et le sol avant irrigation (figure 10a). Cette différence se traduit par une diminution surprenante de la CE de ces sols irrigués. En effet, l'apport d'urine et des EGTS riches en sels devrait probablement augmenter la CE. Ce qui n'est pas le cas pour notre étude. Cette baisse de CE aurait pour origine les pluies survenues lors de notre expérimentation qui a facilité le lessivage et le drainage des sols cultivés. En outre, une accumulation de sels dans le sol se produit lorsque la concentration en sels appliquée au sol par l'irrigation des eaux grises est supérieure à la quantité de sels quittant ou est lessivé du sol (Pettygrove and Asano, 1985).

Au niveau de la profondeur (15-30cm), il n'y a pas de différence significative ($p < 0,05$) entre les sols traités et le sol initial. Cependant, nous observons que la valeur de CE au niveau de T0 (212,65 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est significativement supérieure ($p < 0,05$) à celle de T4 (49 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette différence pourrait s'expliquer par l'apport des urines au niveau de T0. Comme, nous l'avons

signalé plus haut, les urines contiennent une forte proportion des sels susceptibles d'augmenter la conductivité électrique des sols.

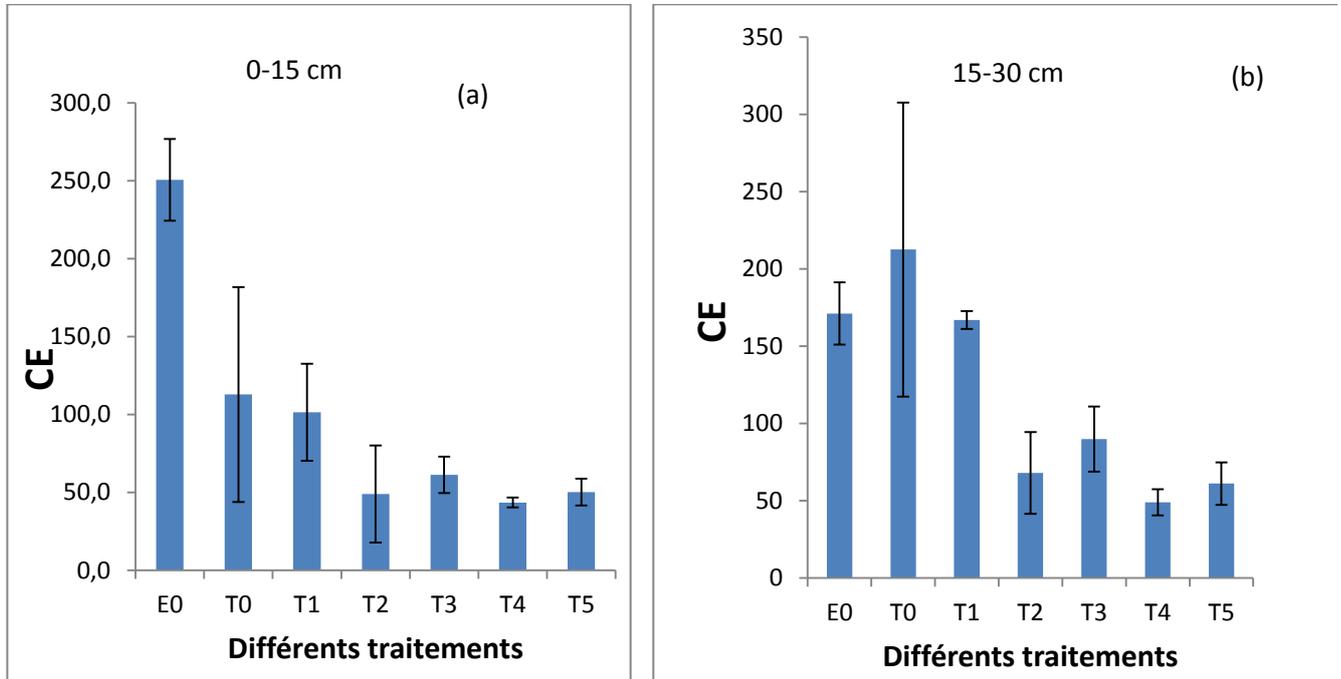


Figure 10 : Valeurs de la conductivité électrique (CE)

3.4.3 SAR

La figure 11 a et b présente les valeurs de SAR du sol initial et des sols irrigués aux différentes profondeurs respectives 0-15cm et 15-30cm. Nous avons des valeurs de SAR de 0,8 et 0,3 pour les profondeurs 0-15cm et 15-30 respectivement.

Au niveau de la profondeur 0-15cm, il n'y a pas de différence significative ($p < 0,05$) entre les valeurs de SAR du sol initial et des sols irrigués. Cependant, il a été observé des valeurs élevées de SAR (12,10 et 9) au niveau des sols irriguées avec les EGTS. Ces valeurs élevées de SAR proviendraient probablement des savons et détergents qui renferment une forte proportion de sodium et utilisés au cours des lessives et vaisselles (Gross et al., 2005).

Il faut noter qu'une utilisation continue de ces eaux grises pourrait à long terme être préjudiciable à la conductivité hydraulique et les propriétés physiques des sols donc à la productivité des plantes (Wiel-shafran et al., 2006).

Contrairement à la profondeur 0-15cm, les valeurs de SAR restent faibles à celle de 15-30cm pour tous les traitements et comparées à celle du sol initial (figure 11b). Similairement aux observations précédentes, les valeurs de SAR des sols irriguées avec les EGTS (T1, T3) sont plus élevées que celles obtenues avec les eaux de barrage (T0, T2 et T4).

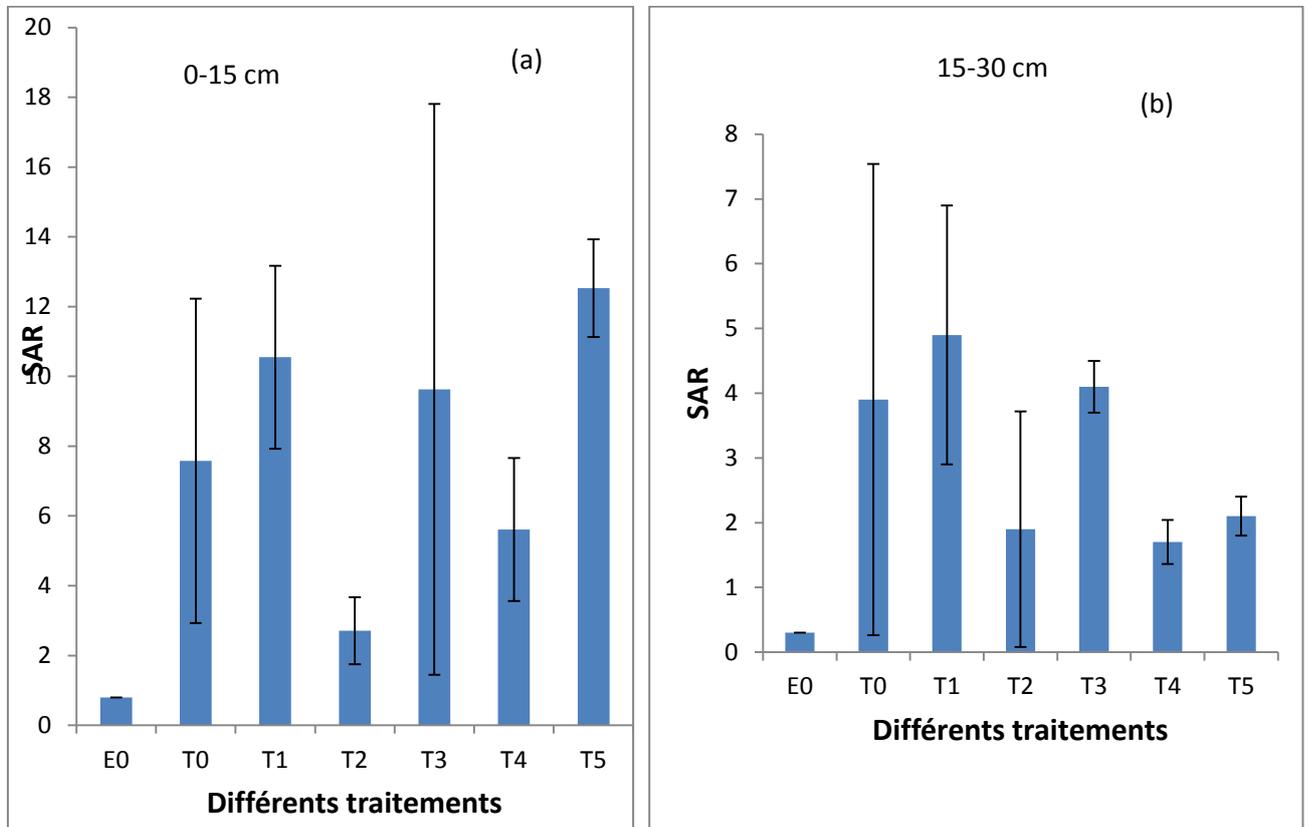


Figure 11 : Valeurs du SAR

CONCLUSION

Au terme de cette étude, les conclusions obtenues fournissent des informations complémentaires sur la réutilisation des eaux grises traitées et des excréta humains en agriculture en milieu sahélien. La caractérisation de ces sous-produits de l'assainissement a révélé la présence d'éléments nutritifs dans les eaux grises, les urines et le compost à base de fèces humaines. Les nutriments contenus dans les eaux grises traitées améliorent la croissance et le rendement des plantes du gombo. Bien que, les excréta humains contiennent aussi une quantité élevée de nutriments, il s'avère dans la présente étude que ce sont les eaux grises traitées qui apportent le meilleur rendement en terme de fruits et les plantes ont une très bonne croissance avec ce traitement. La réutilisation des excréta humains et des eaux grises traitées est appropriée au contexte sahélien, compte tenu de la rareté de l'eau et de l'inaccessibilité aux engrais chimiques par les populations. L'utilisation des eaux grises traitées en agriculture permet de dispenser les agriculteurs de l'utilisation d'engrais chimique et même d'engrais organiques (urine et compost). Toutefois, la réutilisation des sous-produits de l'assainissement écologique peut néanmoins présenter des risques potentiels sur la santé humaine et l'environnement, bien que les études en ce domaine soient encore trop rares, notamment en Afrique. Ainsi, des études futures sont nécessaires pour étudier les risques pour la santé associés à cette réutilisation en agriculture.

BIBLIOGRAPHIE

Adoum, A. (2011). Caractérisation quantitative et qualitative des eaux grises en zone péri-urbaine au Burkina Faso: Cas du village de Kamboinse.

Akpan-Idiok, A.U., Udo, I.A., and Braide, E.I. (2012). The use of human urine as an organic fertilizer in the production of okra (*Abelmoschus esculentus*) in South Eastern Nigeria. *Ressources, Conservation and Recycling* 62, 14–20.

Akponikpè, P.B., Wima, K., Yacouba, H., and Mermoud, A. (2011). Reuse of domestic wastewater treated in macrophyte ponds to irrigate tomato and eggplant in semi-arid West-Africa: Benefits and risks. *Agricultural Water Management* 98 834–840.

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

Almeida, M., Butler, D., and Friedler, E. (1999). At-source domestic wastewater quality.

Anwar, A.H.M.F. (2012). Reuse of laundry greywater in irrigation and its effects on soil hydrologic parameters. *International Conference on Future Environment and Energy* 28, 5.

Berney, M., Weilenmann, H.-U., Simonetti, A., and Egli, T. (2006). Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella typhimurium* and *Vibrio cholerae*. *Applied and Environmental Microbiology* 72, 2586–2593.

Birks, R., & Hills, S. (2007). Characterisation of Indicator Organisms and Pathogens in Domestic Greywater for Recycling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129(1-3), 61-69.

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

Dagerskog, L., and Bonzi, M. (2010). Opening minds and closing loops – productive sanitation initiatives in Burkina Faso and Niger.

Department of Water Affairs and Forestry (1996). South African Water, Quality Guidelines.

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

Esrey, S., Andersson, I., Hillers, A., and Sawyer, R. (2001). Closing the loop: ecological sanitation for food security. *Water Resources* 18, 43–47.

FAO (2003). Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

Featherstone, D. (1999). Why are faeces always brown Posted by Dave Featherstone, ID. 940020090.Mi. Dept. of Biology, University of Utah, Salt Lake City, UT. Also available at <http://www.madsci.org/posts/archives/1999-11/943453986.Mi.r.html>.

- Friedler, E. (2004). Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse possibilities. *Environ Technol* 25, 997–1008.
- Gao, X.Z., Shen, T., Zheng, Y., Sun, X., Huang, S., Ren, Q., Zhang, X., Tian, Y., and Luan, G. (2002). Practical manure handbook. (In Chinese). Chinese Agriculture Publishing House. Beijing, China.
- Geldreich, E. (1978). Bacterial populations and indicator concepts in fèces, sewage, stormwater and solid wastes. In: Berg, G. (ed). Indicators of viruses in water and food.
- Germer, J., Addai, S., and Sauerborn, J. (2011). Response of grain sorghum to fertilisation with human urine. *Field Crops Research* 122, 234–241.
- Gross, A., Azulai, N., Oron, G., Ronen, Z., Arnold, M., and Nejdat, A. (2005). Environmental impact and health risks associated with greywater irrigation: a case study, *Water Sci. & Technol.* 52 (8):161–169.
- Gross, A., Kaplan, D., and Baker, K. (2007). Removal of chemical and microbiological contaminants from domestic greywater using a recycled vertical flow bioreactor (RVFB). *Ecol Eng.*, 31:107–14.
- Grubben, H., Denton, O., Messiaen, C., Schippers, R., Lemaneus, R., and Oyen, L.. (2004). Plant Resources of Tropical Africa 2. Prota Foundation, Netherland 27–29.
- Heinonen-Tanski, H., Sjöblom, A., Fabritius, H., and Karinen, P. (2007). Pure human urine is a good fertilizer for cucumbers. *Bioresource Technology* 98, 214–217.
- Henze, M., Harremoës, P., Jes la Cour, J., and Arvin, E. (2002). Wastewater Treatment – Biological and Chemical Processes.
- Höglund, C., Stenström, T., Jönsson, H., and Sundin, A. (1998). Evaluation of faecal contamination microbial die off in urine separating sewage systems.
- Jönsson, H., Stintzing, A.R., Vinnerås, B., and Salomon, E. (2004). Directives pour une Utilisation des Urines et des Fèces dans la Production Agricole.
- Karak, T., & Bhattacharyya, P. (2011) Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 400-408
- Kiba, D.I. (2005). VALORISATION AGRONOMIQUE DES EXCRETA HUMAINS : utilisation des urines et fèces humains pour la production de l'Aubergine (*Solanum melongena*) et du Maïs (*Zea mays*) dans la zone centre du Burkina Faso.
- Kirchmann, H., and Pettersson, S. (1995). Human urine -Chemical composition and fertilizer use efficiency. *Fertilizer Research* 40, 149–154.
- Kiziloglu, F., Turan, M., Sahin, U., Kuslu, Y., and Dursun, A. (2008). Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey.

- Larsen, T., Lienert, J., Joss, A., and Siegrist, H. (2004). How to avoid pharmaceuticals in the aquatic environment. *Journal of Biotechnology* 295–304.
- Lopez, Z., M. A., Funamizu, N., and Takakuwa, T. (2002). Onsite wastewater differentiable treatment system: modelling approach. *Wat. Sci. Tech* 46, 317–324.
- Mekorot (2007). *Wastewater Treatment and Reclamation*. Watec 2007, Tel Aviv, Israel.
- 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.
- Mnkeni, P., Kutu, F., and Muchaonyerwa, P. (2008). Evaluation of human urine as a source of nutrients for selected vegetables and maize under tunnel house conditions in the Eastern Cape, South Africa. *Waste Management & Research* 26, 132–139.
- Mnkeni, P.N., Jiménez Cisneros, B., Phasha, M., and Austin, L.. (2006). Use of human excreta from urine-diversion toilets in food gardens: agronomic and health aspects. Water Research Commission.
- Morel, A., and Diener, S. (2006). *Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods*.
- Morgan, P. (2003). Experiments using urine and humus derived from ecological toilets as a source of nutrients for growing crops. Paper Presented at Third World Water Forum, 16–23 March 2003 Available at [Http://aquamor.tripod.com/KYOTO.htm](http://aquamor.tripod.com/KYOTO.htm); 2003.
- Muskolus, A. (2008). Anthropogenic plant nutrients as fertiliser. Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Humboldt- Universität zu Berlin, Berlin, Germany.
- Niwagaba, C.. (2009). *Treatment Technologies for Human Faeces and Urine*. Doctoral Thesis. Faculty of Technology, Makerere University Kampala, Uganda.
- OMS (2012). *Utilisation des excréta et des eaux usées ménagères en agriculture*.
- Ottosson, J. (2003). Hygiene aspects of greywater and greywater reuse. Royal Institute of technology (KTH)/Swedish Institute for Infectious Disease Control (SMI), Stockholm: Licentiate Thesis.
- Pescod, M.. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper No 47*, FAO, Rome, P. 125.
- Pettygrove, G., and Asano, T. (1985). *Irrigation with reclaimed municipal wastewater. A Guidance Manual* Lewis Publishers Inc, 495p.
- Pradhan, K., Sjöblom, A., Nerg, A., Holopainen, J., and Heinonen-Tanski, H. (2007). Use of Human Urine Fertilizer in Cultivation of Cabbage (*Brassicaoleracea*) Impacts on Chemical, Microbial, and Flavor Quality *J. Agric. Food Chem.*, 55 (21), 8657-8663.
- Prüss, A., Kay, D., Fewtrell, L., and Bartram, J. (2002). Estimating the global burden of disease from water, sanitation, and hygiene at the global level. *Environmental Health Perspectives* 537–542.

Roesner, L., Qian, Y., Criswell, M., Stromberger, M., and Klein, S. (1994). Long-Term Effects of Landscape Irrigation Using Household Graywater— Literature Review and Synthesis.

Rose, J.B., Sun, G-S., Gerba, C.P., Sinclair, N.A. (1991). Microbial quality and persistence of enteric pathogens in graywater from various household sources. *Water Research*, 25(1), 37-42.

Sangare, D. (2011). Faisabilité du traitement et de réutilisation des eaux grises en milieu rural : cas de Barkoundouba (Ziniaré, Burkina Faso).

sawadogo, M., Balma, D., and Zombre, G. (2006). Expression de différents écotypes de gombo (*Abelmoschus esculentus* L.) au déficit hydrique intervenant pendant la boutonnisation et la floraison. *BASE, Biotechnologique, Agronomie, Société, Environnement* 10, 43.

Sawadogo, M., Balma, D., Nana, R., and Meto Kazile Tuosan Livius Sumda, R. (2009). Diversité agronomique et commercialisation du gombo (*Abelmoschus esculentus* L.) à Ouagadougou et ses environs. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 326–336.

Sene, M., Hijikata, N., Ushijima, K., and Funamizu, N. (2012). Adequate human urine application pattern for agriculture. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science* 2, 038–045.

Sene, M., Hijikata, N., Ushijima, K., and Funamizu, N. (2013). Effects of extra human urine volume application in plant and soil.

Sossou, S., Hijikata, N., Sou, M., Tezuka, R., Maiga, A., and Funamizu, N. (2013). Inactivation mechanisms of pathogenic bacteria in several matrixes during the composting process in a composting toilet. *Environmental Technology* 35, 674–680.

Sridevi, G., Srinivasamurthy, C., Bhaskar, C., and Viswanath, S. (2009). Evaluation of Source Separated Human Urine (ALW) as a Source of Nutrients for Banana Cultivation and Impact on Quality Parameter. *Journal of Agricultural and Biological Science* Vol. 4, No. 5, September 2009 ISSN 1990-6145 ARPN 4.

Tagro, V. (2012). Performance de la désinfection Solaire (SODIS) sur le traitement des urines destinées à l'agriculture.

Tanski, H.H., Pradhan, S.K., and Karinen, P. (2010). Sustainable Sanitation—A Cost-Effective Tool to Improve Plant Yields and the Environment. *Sustainability* 2, 341–351.

Tonner-Klank, L., Moller, J., Forslund, A., and Dalsgaard, A. (2007). Microbiological assessments of compost toilets: In situ measurements and laboratory studies on the survival of fecal microbial indicators using sentinel chambers.

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

Travis, Micheal., Wiel-Shafran, Alit., Weisbrod, Noam., Eilon Adar., Amit Gross (2010). Greywater reuse for irrigation: Effect on soil properties. *Science of the Total Environment* 408, 2501-2508.

Ünlükara, A., Kurunç, A., Kesmez, D., and Yurtseven, E. (2008). Growth and Evapotranspiration of Okra (*Abelmoschus Esculentus* L.) as Influenced by Salinity of Irrigation Water. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134, 160-166.

Ushijima, K., Hijikata, N., Ito, R., and Funamizu, N. (2011). Effect Estimation of Dry-Toilet Application for Rural Farmer Family in Burkina Faso.

Vinnerås, B. (2002). Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine diversion. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering.

Vinnerås, B., and Jönsson, H. (2002). The performance and potential of faecal separation and urinediversion to recycle plant nutrients in household wastewater. *Bioresource Technology* 84, 275–282.

WHO (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, Vol. 4, Excreta and Greywater Use in Agriculture.

Wielshafran, A., Ronen, Z., Weisbrod, N., Adar, E., and Gross, A. (2006). Potential changes in soil properties following irrigation with surfactant-rich greywater. *Ecol Eng* 26, 348–354.

Winker, M., Vinneras, B., Muskolus, A., Arnold, U., and Clemens, J. (2009). Fertilizer products from new sanitation systems: their potential values and risks.

[CSL STYLE ERROR: reference with no printed form.]

ANNEXES

Annexe 1: Calcul des besoins en eau

CALENDRIER D'IRRIGATION DES CULTURES

Station ETo: OUAGADOUGOU Culture: OKRA Date de plantation:
14/03/2014

Station Pluie: OUAGADOUGOU Sol: RED SANDY LOAM Date de récolte:
30/05/2014

Baisse Rdt: 0,0 %

Crop scheduling options

Échéance: Irriguer à 100 % épuisement

Apport: Recharger à 100 % de la capacité au champ

Eff. au champ 70 %

Format Tableau:hydrique journalier
Bilan

Date	Jour	Phase	Pluie	Ks	Etr	Épuis.	Irr.	NeDéficit	Perte	Irr.Br	Irr.Br
			mm	fract.	mm/jour	%	mm	mm	mm	mm	l
14-	1	Init	0	1	2,7	95	2,7	0	0	3,9	6
15-	2	Init	0	1	2,7	63	2,7	0	0	3,9	6
16-	3	Init	0	1	2,7	47	2,7	0	0	3,9	6
17-	4	Init	0,7	1	2,7	38	0	2,7	0	0	0
18-	5	Init	0	1	2,7	63	5,4	0	0	7,7	12
19-	6	Init	0	1	2,7	27	0	2,7	0	0	0
20-	7	Init	0	1	2,7	47	5,4	0	0	7,7	12
21-	8	Init	0	1	3,1	24	0	3,1	0	0	0
22-	9	Init	0	1	3,1	42	0	6,1	0	0	0
23-	10	Init	1,8	1	3,1	46	7,4	0	0	10,5	16
24-	11	Init	0	1	3,1	18	0	3,1	0	0	0
25-	12	Init	0	1	3,1	33	0	6,1	0	0	0
26-	13	Init	0	1	3,1	45	9,2	0	0	13,1	20
27-	14	Init	1,8	1	3,1	14	0	3,1	0	0	0
28-	15	Croiss.	0	1	3,1	26	0	6,1	0	0	0
29-	16	Croiss.	0	1	3,1	37	0	9,2	0	0	0
30-	17	Croiss.	0	1	3,1	47	12,	0	0	17,5	27
31-	18	Croiss.	0	1	3,1	11	0	3,1	0	0	0
01-avr	19	Croiss.	0	1	6,1	32	0	9,2	0	0	0
02-avr	20	Croiss.	0	1	6,1	50	15,	0	0	21,9	34

Réutilisation Combinée des eaux grises traitées et excréta humains en agriculture en milieu sahélien

03-avr	21	Croiss.	2,5	1	6,1	19	0	6,1	0	0	0
04-avr	22	Croiss.	0	1	6,1	37	0	12,3	0	0	0
05-avr	23	Croiss.	0	1	6,1	53	18,	0	0	26,3	41
06-avr	24	Croiss.	0	1	6,1	17	0	6,1	0	0	0
07-avr	25	Croiss.	2,5	1	6,1	26	0	9,7	0	0	0
08-avr	26	Croiss.	0	1	6,1	41	0	15,9	0	0	0
09-avr	27	Croiss.	0	1	6,1	54	22	0	0	31,4	49
10-avr	28	Croiss.	0	1	6,1	15	0	6,1	0	0	0
11-avr	29	Mi-sais	0	1	7,8	33	0	14	0	0	0
12-avr	30	Mi-sais	0	1	7,8	52	21,	0	0	31,1	49
13-avr	31	Mi-sais	3,3	1	7,8	19	0	7,8	0	0	0
14-avr	32	Mi-sais	0	1	7,8	37	0	15,6	0	0	0
15-avr	33	Mi-sais	0	1	7,8	56	23,	0	0	33,5	52
16-avr	34	Mi-sais	0	1	7,8	19	0	7,8	0	0	0
17-avr	35	Mi-sais	3,3	1	7,8	29	0	12,3	0	0	0
18-avr	36	Mi-sais	0	1	7,8	48	20,	0	0	28,8	45
19-avr	37	Mi-sais	0	1	7,8	19	0	7,8	0	0	0
20-avr	38	Mi-sais	0	1	7,8	37	0	15,6	0	0	0
21-avr	39	Mi-sais	0	1	7,6	55	23,	0	0	33,3	52
22-avr	40	Mi-sais	0	1	7,6	18	0	7,6	0	0	0
23-avr	41	Mi-sais	6,2	1	7,6	22	0	9,1	0	0	0
24-avr	42	Mi-sais	0	1	7,6	40	0	16,7	0	0	0
25-avr	43	Mi-sais	0	1	7,6	58	24,	0	0	34,8	54
26-avr	44	Mi-sais	0	1	7,6	18	0	7,6	0	0	0
27-avr	45	Mi-sais	6,2	1	7,6	22	0	9,1	0	0	0
28-avr	46	Mi-sais	0	1	7,6	40	0	16,7	0	0	0
29-avr	47	Mi-sais	0	1	7,6	58	24,	0	0	34,8	54
30-avr	48	Mi-sais	0	1	7,6	18	0	7,6	0	0	0
01-mai	49	Mi-sais	0	1	7,5	36	0	15,1	0	0	0
02-mai	50	Mi-sais	0	1	7,5	54	22,6	0	0	32,2	50
03-mai	51	Mi-sais	9,5	1	7,5	18	0	7,5	0	0	0
04-mai	52	Mi-sais	0	1	7,5	36	0	14,9	0	0	0
05-mai	53	Mi-sais	0	1	7,5	53	22,4	0	0	32	50
06-mai	54	Mi-sais	0	1	7,5	18	0	7,5	0	0	0
07-mai	55	Mi-sais	9,5	1	7,5	18	0	7,5	0	0	0
08-mai	56	Mi-sais	0	1	7,5	36	0	14,9	0	0	0
09-mai	57	Mi-sais	0	1	7,5	53	22,4	0	0	32	50
10-mai	58	Mi-sais	0	1	7,5	18	0	7,5	0	0	0
11-mai	59	Mi-sais	0	1	7,3	35	0	14,7	0	0	0
12-mai	60	Mi-sais	0	1	7,3	52	22	0	0	31,5	49
13-mai	61	Mi-sais	12,3	1	7,3	17	0	7,3	0	0	0
14-mai	62	Mi-sais	0	1	7,3	35	0	14,6	0	0	0
15-mai	63	Mi-sais	0	1	7,3	52	21,8	0	0	31,2	49
16-mai	64	Mi-sais	0	1	7,3	17	0	7,3	0	0	0
17-mai	65	Mi-sais	12,3	1	7,3	17	0	7,3	0	0	0
18-mai	66	Mi-sais	0	1	7,3	35	0	14,6	0	0	0

Réutilisation Combinée des eaux grises traitées et excréta humains en agriculture en milieu sahélien

19-mai	67	Mi-sais	0	1	7,3	52	21,8	0	0	31,2	49
20-mai	68	Mi-sais	0	1	7,3	17	0	7,3	0	0	0
21-mai	69	Fin	0	1	4,5	28	0	11,8	0	0	0
22-mai	70	Fin	0	1	4,5	39	0	16,3	0	0	0
23-mai	71	Fin	14,2	1	4,5	16	0	6,6	0	0	0
24-mai	72	Fin	0	1	4,5	26	0	11,1	0	0	0
25-mai	73	Fin	0	1	4,5	37	0	15,6	0	0	0
26-mai	74	Fin	0	1	4,5	48	20,1	0	0	28,7	45
27-mai	75	Fin	14,2	1	4,5	11	0	4,5	0	0	0
28-mai	76	Fin	0	1	4,5	21	0	9	0	0	0
29-mai	77	Fin	0	1	4,5	32	0	13,5	0	0	0
30-mai	Fin	Fin	0	1	0	32					

Annexe 2 : Tableau présentant la caractérisation des eaux d'irrigation

	EB	EGTS
pH	7,54	7,34
EC (µS/cm)	189,7	497,5
OD (PPM)	3,39	2,23
Température (°C)	28,6	25,5
Azote Total (mg/l)	0,84	15,9
Phosphore total (mg/l)	2,8	11,9
Potassium (mg/l)	11,5	23,1
Sodium (mg/l)	6,4	70,3
Calcium (mg/l)	20,4	19,8
Magnésium (mg/l)	4	4,4
Chlorure (mg/l)	3,15	19,6
Surfactants (mg/l)	-	1,8
SAR	0,3	3,7
NH₄⁺(mg/l)	0,78	5,8
NO₃⁻(mg/l)	-	7,5
NO₂⁻(mg/l)	-	-
PO₄³⁻(mg/l)	0,6	0,63
MES	266	30,67
DBO (mg/l)		100
DCO (mg/l)	28,4	280
<i>E.Coli</i> (ufc/100ml)	-	-
Coliformes totaux (ufc/100ml)	3,5.10 ³	5,72.10 ⁴
Coliformes thermotolérants (ufc/100ml)	-	-
Entérocoques (ufc/100ml)	-	-

ANNEXE 3 : Tableau présentant le rendement des fruits par traitement en T/ha

T	T/ha
T0	0,26
T0	0,71
T0	0,65
T0	1,51
T0	0,49
T0	0,41
T0	0,09
T0	0,62
T0	0,37
T0	0,79
T0	0,45
T0	0,21
T1	0,27
T1	0,36
T1	0,44
T1	1,36
T1	0,48
T1	0,87
T1	0,02
T1	0,07
T1	0,22
T1	0,24
T1	0,86
T1	0,03
T2	0,14

T2	0,08
T2	0,37
T2	0,03
T2	0,12
T2	0,08
T2	0,10
T2	0,32
T2	0,09
T2	0,09
T2	0,63
T2	0,35
T3	0,23
T3	0,40
T3	0,12
T3	0,19
T3	0,23
T3	0,40
T3	0,12
T3	0,19
T3	0,11
T3	0,13
T3	0,50
T3	0,58
T4	0,07
T4	0,35
T4	0,10
T4	0,36

T4	0,07
T4	0,61
T4	0,18
T4	0,45
T4	0,07
T4	0,09
T4	0,55
T4	0,13
T5	0,35
T5	0,56
T5	0,97
T5	0,39
T5	0,99
T5	0,90
T5	1,38
T5	0,22
T5	0,64
T5	1,04
T5	0,57
T5	0,63

ANNEXE 4: Tableau présentant la croissance des plantes en cm par traitement.

Traitement	21ème jour	28ème jour	35ème jour	42ème jour	49ème jour	56ème jour	63ème jour	69ème jour
T0	4,25	7	11,25	15,5	18,25	19	19	30
T0	3	5	6	8,5	12,5	15	20	27
T0	3,5	5,5	9,25	13	15	16	19	25,5
T0	4	7,5	11	15	18	19	18	27,5
T0	6,5	11	14	16,5	17	17	19	22,5
T0	5	7,5	9,5	13	12,5	14	17,5	22,5
T0	4,25	7	8	9,5	11,5	14	15,5	17,5
T0	3,25	5	6,25	7,5	9,5	10,5	12,5	17,5
T0	3,25	5,5	7,25	8,5	12	13,5	14,5	17,5
T1	7,5	9,25	12,5	13	14,5	14,75	17	19
T1	6,25	9,25	12,5	15	16	16	18	19,5
T1	7	10,5	13	12,5	13,5	13	15	17
T1	5,25	9,25	12,5	14	14	15,5	18	22
T1	6	10	14	16,5	17,5	18,5	21	26,5
T1	4	6,5	9,5	12	13,5	15,5	19	24
T1	4,75	8,5	10,5	14	17	20,5	26	33
T1	4,25	8	10,5	13,5	16	18	22	26
T1	5,25	9,5	13,25	17	23,5	27,5	30,5	30
T2	5	5	7,25	10	13,5	14,5	17	22
T2	5,25	5	8	12	15	16	18,5	23,5

Réutilisation Combinée des eaux grises traitées et excréta humains en agriculture en milieu sahélien

T2	7,75	7	10	13	16	18,5	21	25,5
T2	1,75	2,25	3	4	1,5	8	11,5	14,5
T2		2,75	4	5,5	6	7	10	12,5
T2	3	3,5	5	8	10	11	12,5	19
T2	3,25	6,5	8	8,5	10	13	14,5	16,5
T2	2,25	4	6,75	10	14,5	14,5	21,5	23,5
T2	4	7	7	12	12	13	15,5	18,5
T3	3,75	5,25	9,5	15	21,5	25	29,5	35
T3	4	8,5	13,5	19	26	29,25	32,5	35
T3	3	5	9	16,5	23,25	27,5	34,5	44
T3	3,75	4,5	5,5	8	12	13,75	16	12
T3	4,25	6	8	11	12,5	13,5	16	10,5
T3	6,5	9	12,5	16	20	19	21,5	12
T3	2,25	4	6	8	10	12	15	20
T3	4	6,75	9,25	10,5	10,5	13	15,5	18,5
T3	2	4	4	4	6	9,5	11,5	13,5
T4	4,75	6,5	7,5	10,25	11,5	10,5	12	14
T4	5	6,5	8,5	10,5	13,5	14,5	15	17
T4	4,25	5,25	7	8,5	9,75	10,5	11,5	12,5
T4	3,5	4,75	6	7	8,5	11	13,5	14,5
T4	5,5	8,5	10,5	14	19	20,5	24,5	20
T4	5,25	6,5	9	12,5	16	16,5	18,5	24

Réutilisation Combinée des eaux grises traitées et excréta humains en agriculture en milieu sahélien

T4	2,75	2,5	3,5	5	5	8,5	11,5	14
T4	2,75	4	6,25	9	10,5	14,5	18	23
T4	2,75	3,5	4,25	5	6,5	8,5	10,5	12,5
T5	5,75	11	14	20	25,5	22	29	33
T5	5,5	10,5	14	19,75	22,5	24	25,5	30
T5	7	11,5	19,5	24	27	31	37,5	46
T5	4,75	6	8,5	11	11,5	14	16,5	22,5
T5	3,5	6,5	9,25	13,5	13	13,5	15	17,5
T5	3,5	5	7,5	11	10,5	11	13,5	16
T5	6,25	10	13	15,5	15,5	16,5	19,5	24
T5	6,25	10	13,5	19	24	25,5	28	32
T5	6,5	9,5	13	18,5	21,5	23	25,5	30