

BURKINA FASO

UNITE-PROGRES-JUSTICE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENTS SUPERIEUR, DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET DE L'INNOVATION (MESRSI)**

UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO (UPB)

INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL (IDR)



MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur du Développement Rural

Option : Vulgarisation Agricole

Présenté par : BOUGMA Pawend-taoré Christian

THÈME:

**IMPACTS DE TROIS SYSTÈMES DE MARAÏCHAGE
SUR DES PARAMÈTRES CHIMIQUES ET
BIOLOGIQUES DES SOLS A OUAGADOUGOU
(BURKINA FASO)**

Maître de stage : Dr LOMPO J-P Désiré

Co-maître de stage : Dr KIBA D Innocent

Directeur de Mémoire:

Dr COULIBALY Kalifa

N° d'ordre...../ 2016 / VA

MARS 2016

DÉDICACE

A ma mère, à mes frères et sœur

Et à la mémoire de mon frère Stéphane rappelé à Dieu

Je dédie ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----------|
| DÉDICACE | i |
| REMERCIEMENTS..... | v |
| LISTE DES TABLEAUX | viii |
| LISTE DES FIGURES | ix |
| LISTE DES PHOTOS..... | x |
| RÉSUMÉ..... | xi |
| ABSTRACT | xii |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE | 4 |
| 1.1. Définitions des Concepts..... | 4 |
| 1.1.1. Agriculture urbaine | 4 |
| 1.1.2. Eaux usées | 4 |
| 1.1.2.1. Eaux usées traitées | 4 |
| 1.1.2.2. Eaux usées domestiques..... | 5 |
| 1.1.2.3. Eaux usées industrielles | 5 |
| 1.2. État des lieux de l'agriculture urbaine à Ouagadougou..... | 5 |
| 1.2.1. Contexte de l'agriculture urbaine à Kossodo | 6 |
| 1.2.3. Caractérisation des eaux usées traitées de Kossodo..... | 7 |
| 1.2.4. Caractéristiques des sols des zones de maraîchage à Ouagadougou..... | 8 |
| 1.2.5 Impacts des eaux usées sur la fertilisation et sur les rendements des cultures | 9 |
| 1.2.5.1. Valeur fertilisante des eaux usées | 9 |
| 1.2.5.2. Impacts des eaux usées sur les rendements agricoles..... | 9 |
| 1.2.6. Impacts des eaux usées sur les paramètres chimiques des sols | 10 |
| 1.2.6.1 Impacts des eaux usées sur la salinité des sols | 11 |
| 1.2.6.2. Incidence de l'eau d'irrigation sur la concentration en sel..... | 12 |
| 1.2.6.3. Effets des eaux usées sur la vitesse d'infiltration et la capacité de rétention de l'eau | 12 |

| | |
|--|-----------|
| 1.2.6.4. Phénomène de Sodisation des sols | 13 |
| 1.2.6.5. Augmentation du pH des sols..... | 14 |
| 1.2.6.6. Effets des eaux usées sur les bases échangeables et la capacité d'échange cationique des sols | 14 |
| 1.2.6.7. Impacts des eaux usées sur la contamination des sols en métaux lourds | 15 |
| 1.2.7. Effets des eaux usées sur les caractéristiques biologiques des sols..... | 16 |
| CHAPITRE 2: MATÉRIELS ET MÉTHODES | 17 |
| 2.1. Matériels..... | 17 |
| 2.1.1 La zone d'étude | 17 |
| 2.1.2. Les sols..... | 18 |
| 2.1.3 Les eaux d'irrigation | 18 |
| 2.2. Méthodes..... | 19 |
| 2.2.1. Démarche globale de l'étude..... | 19 |
| 2.2.2. Choix des sites maraîchers | 19 |
| 2.2.3. Présentation des sites maraîchers sélectionnés..... | 19 |
| 2.2.3.1. Site de Kossodo..... | 19 |
| 2.2.3.2. Site de Wayalghin | 20 |
| 2.2.3.3. Site de Boulmiougou..... | 20 |
| 2.2.4. Caractérisation des sites étudiés | 20 |
| 2.2.5. Choix des parcelles de producteurs pour les prélèvements de sol..... | 21 |
| 2.2.6. Méthode de détermination de l'impact de différents systèmes maraîchers sur les paramètres chimiques et biologiques des sols | 21 |
| 2.2.6.1. Méthodes d'échantillonnage des sols et des eaux d'irrigation | 21 |
| 2.2.6.1.1. Méthode échantillonnage des sols..... | 21 |
| 2.2.6.1.2. Méthode d'échantillonnage des eaux d'irrigation | 22 |
| 2.2.6.2. Paramètres étudiés et méthodes de détermination..... | 22 |
| 2.2.6.2.1. Paramètres chimiques des eaux..... | 22 |
| 2.2.4.2.2. Paramètres chimiques des sols. | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.6.2.3. Paramètres biologiques des sols | 24 |
| 2.3. Traitement des données | 26 |
| CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSION | 27 |
| 3.1. Résultats | 27 |
| 3.1.1. Caractéristiques des sites maraîchers étudiés | 27 |
| 3.1.1.1. Site de Kossodo | 27 |
| 3.1.1.2. Site de Wyalghin | 27 |
| 3.1.1.3. Site de Boulmiougou | 28 |
| 3.1.2. Caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation..... | 30 |
| 3.1.3. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur les caractéristiques chimiques des sols étudiés.... | 32 |
| 3.1.4. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur la biologie des sols | 35 |
| 3.1.4.1. L'activité microbienne des sols..... | 35 |
| 3.1.4.2. Dégagement cumulé de CO ₂ des sols | 37 |
| 3.1.4.3. La biomasse microbienne des sols | 38 |
| 3.1.4.4. Quotient respiratoire des sols | 38 |
| 3.2. Discussions..... | 40 |
| 3.2.1. Caractéristiques des trois (03) sites de maraîchage..... | 40 |
| 3.2.2. Caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation des sites étudiés | 41 |
| 3.2.3. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur la fertilité chimiques des sols | 42 |
| 3.2.4. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur l'activité biologique des sols | 49 |
| 3.2.5. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur la biomasse microbienne et le quotient respiratoire des sols des sites maraîchers étudiés | 50 |
| CONCLUSION..... | 52 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 55 |
| ANNEXES..... | A |

REMERCIEMENTS

Avant tout propos, nous remercions Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la patience et le courage d'accomplir ce présent travail.

Au terme de notre travail, nous voudrions exprimer nos remerciements au feu Docteur BONZI Moussa, ex directeur du Centre Régional de Recherches Environnementale Agricole et de Formation (CREAF) Kamboinsé pour nous avoir acceptés au sein de la station de recherche de Kamboinsé.

Nous voulons traduire nos remerciements au Docteur HEIN Mipro et au Docteur BACYE Bernard qui, en tant que membres de notre jury ont apporté suggestions, critiques et recommandations qui nous ont permis d'aboutir à ce document final.

Nos remerciements les plus sincères vont au Docteur COULIBALY Kalifa, qui, en tant que Directeur de mémoire, s'est montré compréhensible et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous voudrions traduire notre profonde reconnaissance au Docteur LOMPO Désiré, notre maître de stage et au Docteur KIBA Innocent notre Co-maître de stage pour leurs franche collaboration et surtout pour leurs conseils très remarquables qui nous ont éclairé le chemin de la recherche.

Nous disons également merci au Docteur SAWADOGO Jacques, à Mr OUANDAOGO Noufou, à Mr SANON Bachirou, à Mr TRAORE Abidine, à Mr ZONGO Nongma et à Mr SORY Ibrahim pour leurs conseils et suggestions.

Pour les analyses au laboratoire, nous exprimons notre gratitude au technicien OUATTARA Amoro dit « *Docteur* » ainsi qu'à l'équipe technique de FARAKOBA. Nous n'oublions pas l'équipe technique du laboratoire Sol- Eau- Plante (SEP) de Kamboinsé.

C'est le moment de remercier Mlle BARO Awa, Mr SANOGO Salifou et Mr TONSA Didier pour leur soutien, leurs suggestions et critiques qui nous ont permis d'améliorer la qualité du document.

Nos remerciements vont à l'endroit de toute notre famille, mes parents qui n'ont cessé de nous encourager et de nous soutenir durant ces années, mes frères et à ma sœur pour leur soutien et confiance placée en moi.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous nos proches et amis, et à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre nous ont soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à toutes et à tous

SIGLES ET ABREVIATIONS

ARC : Alcalinité Résiduelle Calcique

A U : Agriculture Urbaine

BCEAO : Banque Centrale des Etats de l’Afrique de l’Ouest

BOUL : Boulmiougou

BUNASOL : Bureau National des Sols

CEC : Capacité d’Echange Cationique

DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène, en 5 jours

DCO₅ : Demande Chimique en Oxygène

Ec : Conductivité Electrique

EIER : Ecole Inter états d’Ingénieurs de l’Equipement Rural

ET : Eaux Témoins

EU : Eau Usée

EUT : Eaux Usées Traitées

EUNT : Eaux Usées Non Traitées

FAO : Food and Agriculture Organization

IAGU : Institut Africain de Gestion Urbaine

INERA : Institut de l’Environnement et de Recherches Agricoles

KOS : Kossodo

LSD: Least Significant Difference

MO : Matière Organique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONEA : Office National de l’Eau et de l’Assainissement

ORSTOM : Office de la Recherche des Sciences et Techniques Outre Mer

PACVU : Projet d'Amélioration des Conditions de Vie Urbaine

PSAO : Plan Stratégique d'Assainissement de la ville de Ouagadougou

PSE : Pourcentage de Sodium Echangeable

RUAF : Réseau Francophone de l'Agriculture Urbaine

SAR : Sodium Absorption Ratio

STEP: Station Epuration

TAN ALIZ : Tannerie Alizata

WAY: Wayalghin

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Paramètres chimiques des eaux d'irrigation de Kossodo | 8 |
| Tableau 2 : Caractéristiques culturales des systèmes maraîchers des sites étudiés..... | 29 |
| Tableau 3: Caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation des sites maraîchers étudiés..... | 31 |
| Tableau 4: Caractéristiques chimiques des sols des sites maraîchers de Kossodo, Wayalghin et Boulmiougou..... | 33 |
| Tableau 5: Bases échangeables, CEC et Ec des sols maraîchers | 34 |
| Tableau 6 : Biomasse microbienne et quotient respiratoire des sols maraîchers | 39 |
| Tableau 7 : Normes burkinabè de qualité des sols | A |
| Tableau 8: Normes de l'ORSTOM pour l'appréciation qualitative de quelques caractéristiques chimiques des sols tropicaux (Kaboré, 1995 cité par Traoré, 2000)..... | A |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1: Carte administrative de la Commune de Ouagadougou, Source: Conchita G. Kedowide Mevo Guezo (2011) | 18 |
| Figure 2: Taux d'absorption du sodium et pourcentage de sodium échangeable..... | 35 |
| Figure 3: Evolution journalière du CO2 dégagé des sols des sites maraîchers | 36 |
| Figure 4: Evolution cumulée du CO2 dégagé des sols des sites maraîchers | 38 |

LISTE DES PHOTOS

| | |
|--|---|
| Photo 1: Rejet d'eaux usées le long du canal central | B |
| Photo 2: Rigole d'eaux usées non traitées | B |
| Photo 3: Formation de pellicule noire | B |
| Photo 4: Rigole d'eaux de barrage | B |
| Photo 5: : Réduction de la vitesse d'infiltration | B |
| Photo 6: Rigole d'eaux usées traitées | B |

RÉSUMÉ

A Ouagadougou l'agriculture urbaine se fait selon plusieurs systèmes maraîchers en fonction des caractéristiques des différents sites. Il s'est avéré que les qualités des eaux d'irrigation constituent l'une des principales composantes de ces systèmes. En effet, il a été montré que certains systèmes de maraîchage ont une incidence négative sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols maraîchers. L'objectif assigné à notre étude a consisté à mesurer l'impact de trois systèmes de maraîchage sur la qualité chimique et biologique des sols. Pour ce faire trois sites maraîchers ont été sélectionnés en fonction de leurs systèmes de maraîchage. Ensuite une caractérisation de ces sites et ces eaux d'irrigation a été réalisée. Pour ce qui est des caractéristiques des systèmes de maraîchage, la fertilisation, l'ancienneté du site, la qualité des eaux d'irrigation, la pratique culturale et d'autres paramètres ont été caractérisés afin de mesurer leurs impacts éventuels sur les paramètres chimiques et biologiques des sols.

Il ressort de cette étude que les systèmes de maraîchage étaient mieux développés à Boulmiougou et à Wayalghin qu'à Kossodo. Cependant, les résultats ont montré que les systèmes maraîchers rencontrés à Boulmiougou n'ont pas augmenté significativement les teneurs en éléments minéraux des sols par rapport aux autres systèmes. Ils ont plutôt augmenté la biomasse microbienne ($0,592 \text{ mg C.g}^{-1}$ de sol) et réduit l'activité biologique ($1,08 \text{ mg CO}_2.\text{g}^{-1}$ de sol). Quant au site de Wayalghin, le système de maraîchage a entraîné une hausse des teneurs en éléments minéraux des sols. Les paramètres biologiques des sols de Wayalghin notamment (activité microbienne et quotient respiratoire) sont restés faibles comparativement à ceux du site de Kossodo, mais supérieurs à ceux de Boulmiougou. A Kossodo, le système de maraîchage a plutôt détérioré la qualité chimique et réduit la biomasse microbienne des sols ($0,477 \text{ mg C.g}^{-1}$ de sol). L'étude a révélé que les fortes valeurs de pH (9,56), et de teneur en sodium ($4,39 \text{ Cmol}^+\text{Kg}^{-1}$ de sol) et en conductivité électrique ($1247 \mu\text{S cm}^{-1}$) rencontrées dans les eaux et sur les sols du site de Kossodo étaient responsables de l'alcalinisation, de la sodisation et de la salinisation des sols.

Il ressort de l'étude que l'utilisation des eaux usées traitées de Kossodo est à l'origine de la forte dégradation des sols de Kossodo et qu'elle est totalement inappropriée pour un usage agricole, même en agriculture restrictive.

Mots clés: Impacts, système de maraîchage, agriculture urbaine, paramètres chimiques et biologiques.

ABSTRACT

Urban agriculture in Ouagadougou is confronted to several gardening systems depending on the characteristics of the different sites. It turned out that the quality of irrigation water is one of the main components of these systems. But, it has been shown that some gardening systems create undoubtedly negative impact on the characteristics (physical chemical and biological) of soil gardeners. The objective of our study was to measure the impact of three gardening systems on soil quality. For that, three (03) truck farming sites were selected based on their gardening systems. Then a characterization of these sites and irrigation water was conducted. Concerning the characteristics of gardening systems, fertilization, the age of the site, the quality of irrigation water, crop variation and other parameters were characterized in order to measure their possible impact on the parameters chemical and biological soil.

It appears from this study that the gardening systems were better developed at Wayalghin and Boulmiougou than Kossodo. However, the results show that the gardeners met in Boulmiougou systems have not significantly increased the levels of soil minerals compared to other systems. Instead, they increased microbial biomass (0.592 mg C.g⁻¹ soil) and reduced biological activity (1.08 mg CO₂.g⁻¹ ground). As for the site of Wayalghin, gardening system resulted in higher levels of soil minerals. The biological parameters of soils including Wayalghin (microbial activity and respiratory quotient) remained low compared to the site Kossodo but higher than Boulmiougou. In Kossodo, gardening system has rather deteriorated chemical quality and reduces soil microbial biomass (0.477 mg C.g⁻¹ soil). The study found that high pH values (9.56) and sodium (4.39 Cmol⁺ kg⁻¹ soil) and electrical conductivity (Ec 1247 cm⁻¹) encountered in the waters and soils of Kossodo site were responsible for alkalizing, the sodisation and soil salinization.

It appears from the study that the use of treated wastewater Kossodo is behind the sharp degradation of Kossodo and is totally inappropriate for agricultural use, even in restrictive agriculture

Key words: Impact, gardening systems, urban agriculture, chemical and biological parameters.

INTRODUCTION

Dans les pays en développement la croissance démographique galopante consomme de grandes quantités d'eaux si bien que la FAO estimait que le volume d'eau utilisée dans le monde a progressé deux fois plus que le taux de croissance de la population. Cependant il n'est plus possible de fournir des services fiables d'approvisionnement en eau pour différents usages (FAO, 2007). Cette forte croissance associée à l'urbanisation et au développement entraîne des débits d'eaux usées toujours grandissants qui surpassent les capacités actuelles de gestion, de traitement et de manutention de ces eaux (Huibers *et al.*, 2001).

Au Burkina Faso, la forte urbanisation stimule le développement des activités humaines, et provoque un rejet d'importantes quantités de déchets de toutes sortes dont la gestion et la valorisation constituent un problème majeur pour les autorités politiques et même pour tous les citoyens (Yé, 2007). De ce fait, l'agriculture urbaine offre des solutions à plusieurs problèmes majeurs auxquels sont confrontées les autorités politiques et municipales parmi lesquelles il y a la gestion des eaux usées. Cette politique d'intégration eaux usées-agriculture urbaine permet de pallier le problème des besoins importants d'eaux pour l'agriculture, estimés à 70% des prélèvements, chiffre qui arrive à 95% dans certains pays en développement (Wikiwater, 2012). Plusieurs auteurs ont traité de la réutilisation des eaux usées en agriculture urbaine (FAO, 2003 ; Manios *et al.*, 2006 ; Sou, 2009) et ont conclu qu'elle constitue une alternative sérieuse aux problèmes de rejet des eaux usées dans la nature et contribue significativement à l'amélioration de la sécurité alimentaire des villes.

Cependant, cette agriculture qui s'avérait être une solution au problème de rejets des eaux usées, reste confrontée à l'utilisation de toutes sortes d'eaux usées (eaux usées ménagères ou industrielles) qui s'y opère alors de manière non planifiée et non contrôlée (CTA/ETC-RUAF/CREPA, 2002).

Pour remédier à ces problèmes, le traitement des eaux à des fins agricoles apparaît comme une solution palliative aux effets néfastes de ces effluents. Cependant, le constat général est que le traitement des eaux demeure un luxe pour les pays du Sud du fait des coûts élevés des investissements, si bien que très peu de station d'épuration existe dans les pays en développement. Les quelques expériences en la matière ont montré que la quasi-totalité

des stations d'épuration surtout en Afrique de l'Ouest a cessé de fonctionner et qu'aucune station n'a réellement fonctionné à grande échelle (Koné, 2002).

Lorsque les eaux usées sont utilisées comme la seule source d'irrigation pour les cultures maraîchères dans les régions arides avec une application excessive de nutriments, leur accumulation dans le sol peut avoir des effets défavorables aussi bien sur la productivité des cultures que sur la qualité des sols (Compaoré, 1998 ; Kiziloglu *et al.*, 2008 ; Roberta *et al.*, 2010). Ainsi, les eaux usées possèdent de fortes teneurs en éléments chimiques et pathogènes de provenance industrielle qui dépassent significativement les normes requises par l'OMS et par la FAO pour une réutilisation en agriculture urbaine (Kabore, 2006 ; Thiaw, 2006).

Le traitement optimal des effluents permet de minimiser le risque de transfert des éléments pathogènes, de réduire le problème de pollution des sols et de santé publique, mais aussi de réduire l'utilisation des engrais chimiques.

Pour atténuer les problèmes liés à l'utilisation anarchique des eaux usées dans l'agriculture urbaine de la ville de Ouagadougou, il a été construit dans le quartier Kossodo une station de collecte et d'épuration des eaux usées du centre-ville et de la zone industrielle par lagunage.

La mise en place de cette station devrait permettre de délocaliser les maraîchers situés derrière l'hôpital Yalgado OUEDRAOGO qui utilisaient les eaux usées issues de l'hôpital afin de mettre à leur disposition une eau d'irrigation de qualité et réduire le risque de pollution des cultures et des sols.

Mais force est de constater que l'utilisation des eaux usées traitées de la station a agi négativement sur les sols et que les observations de terrain laissent entrevoir des difficultés réelles de production liées à la qualité de ces sols. Alors, il a été interdit la production de légumes consommables crus.

C'est dans ce cadre que des investigations ont été menées sur plusieurs sites maraîchers de Ouagadougou afin de déterminer l'impact réel des systèmes de maraîchage sur la qualité des sols et d'envisager les possibilités d'amélioration de la fertilité de ces sols.

La présente étude intitulée: « **impacts de trois systèmes de maraîchage sur des paramètres chimiques et biologiques des sols à Ouagadougou (Burkina Faso)** » a eu pour objectif général la détermination de l'impact de différents systèmes maraîchers sur quelques indicateurs de fertilité des sols.

Les objectifs spécifiques sont articulés autour des points suivants :

- caractériser trois sites maraîchers de Ouagadougou,
- déterminer les caractéristiques chimiques de différentes sources d'eaux d'irrigation,
- mesurer de l'impact des systèmes de maraîchage sur des paramètres chimiques et biologiques des sols.

Ainsi nous sommes partis des hypothèses suivantes :

- Les caractéristiques des sites maraîchers améliorent la qualité chimique et biologique des sols,
- Les caractéristiques chimiques des eaux d'irrigations ont une influence négative sur les paramètres chimiques et biologiques des sols,
- Les systèmes de maraîchage utilisant les eaux usées détériorent la qualité chimique et biologique des sols.

Ce présent mémoire est structuré en trois chapitres : le premier traite de la revue bibliographique sur les eaux usées en agriculture urbaine, le second rend compte de la méthodologie adoptée et le dernier est consacré aux résultats expérimentaux auxquels nous avons discuté.

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Définitions des Concepts

1.1.1. Agriculture urbaine

Le concept d'agriculture urbaine dans toute sa globalité a été caractérisé par Moustier *et al.*, (2004) à travers ses différentes approches. Ainsi, ils définissent sa spécificité par rapport à l'agriculture rurale; son caractère opérationnel et la distinction entre agriculture urbaine et périurbaine. Quant à la FAO (1999), elle considère l'agriculture urbaine comme l'ensemble des pratiques agricoles dans les villes et autour des villes qui utilisent des ressources (terre, eau, énergie, main-d'œuvre) pouvant également servir à d'autres usages pour satisfaire les besoins de la population urbaine.

Selon Moustier *et al.*, (2004) l'agriculture urbaine se définit principalement en fonction des limites administratives de la ville et exclue les zones très proches de la ville, mais appartenant à des juridictions différentes de la municipalité, qui peuvent être beaucoup plus influencées par l'expansion de la ville que certaines zones urbaines. Pour Olanrewaju *et al.*, (2004) l'agriculture périurbaine, « au strict sens étymologique, est celle qui se trouve à la périphérie de la ville, quelle que soit la nature de ses systèmes de production ». Avec la ville, cette agriculture peut soit n'avoir que des rapports de mitoyenneté, soit entretenir des rapports fonctionnels réciproques.

En résumé, l'agriculture périurbaine se distingue de l'agriculture urbaine et elle n'est différente de celle-ci que par les limites administratives de la ville.

1.1.2. Eaux usées

Les eaux usées (EU) sont des eaux altérées par les activités humaines à la suite d'un usage domestique (eau ménagère, eau de lessive, eau de cuisine et eau de bain ainsi que les eaux de vannes), industriel, artisanal, agricole ou autre (El rhazi *et al.*, 2007).

1.1.2.1. Eaux usées traitées

Les eaux usées traitées (EUT) sont des eaux usées qui sont passées à travers une station de traitement des eaux en vue d'atteindre certaines normes pour réduire leur degré de pollution ou de risques sanitaires. Dans le cas où elles ne respectent pas ces normes, les eaux usées sont considérées au mieux comme partiellement traitées (Cisneros *et al.*, 2011).

1.1.2.2. Eaux usées domestiques

Selon Baumont *et al.*, (2004) les eaux usées domestiques sont celles qui comprennent les eaux ménagères (eaux de toilette, de lessive, de cuisine) et les eaux de vannes (urines et matières fécales), dans le système dit « tout à- l'égout ».

1.1.2.3. Eaux usées industrielles

Tous les rejets résultants d'une utilisation de l'eau autre que domestique sont qualifiés de rejets industriels (Djeddi, 2007). Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales : blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, etc.

1.2. État des lieux de l'agriculture urbaine à Ouagadougou

L'agriculture urbaine à Ouagadougou regroupe le maraîchage constitué de laitue (*Lactuca sativa L*), chou (*Brassica oleracea L*), tomates (*Solanum lycopersicum*), l'horticulture urbaine (fleurs et arbres fruitiers) et en plus les cultures pluviales : mil (*Pennisetum glaucum L*), riz (*Oryza, sativa*), maïs (*Zea mays*), sorgho (*Sorghum bicolor*) qui se substituent au maraîchage en saison hivernale (Conchita *et al.* 2010). Le maraîchage constitue l'activité la plus répandue et mobilise le plus grand nombre de producteurs dans la ville et ses alentours. Les principaux sites de production sont : Kossodo, Boulmiougou, Wayalghin et Tanghin couvrant à eux seuls environ 30 à 40 hectares (IAGU/RUAF, 2007). À Ouagadougou l'agriculture urbaine est confrontée à de nombreuses difficultés, dont le problème de rareté de la ressource en eau due à une forte compétition entre les différents acteurs autour des sources d'eaux, une pluviométrie devenue de plus en plus précaire. Autrefois (à la période coloniale), l'agriculture urbaine qui était pratiquée autour des barrages, se rencontre de nos jours autour des rejets d'eaux usées résiduelles qui, faute d'un réseau public de collecte d'eaux usées vers des Station d'Épuration des eaux usées (STEP), sont déversées dans des caniveaux ouverts, créés pour drainer les eaux pluviales.

Les ressources en eaux utilisées en AU sont très variées et diversifiées en fonction de la répartition spatiale des sites suivant la principale retenue d'eau et se situe le long des cours d'eau, des barrages, des puits, des bas-fonds marécageux, le long des canaux de drainage des eaux usées, en aval des stations d'épuration (Sawadogo, 2008 ; Conchita *et al.*, 2010).

Face aux problèmes de manque d'eau dans la commune urbaine de Ouagadougou, l'utilisation des eaux usées en agriculture urbaine constitue une alternative. En effet certains auteurs jugent que «l'eau est une ressource trop rare pour n'être utilisée qu'une fois

avant d'être rendue à la nature» (Cissé, 2002 ; Ouédraogo, 2002 ; Kaboré, 2006). Cependant, l'utilisation de ces différents types d'eaux usées en agriculture constitue donc un risque sanitaire pour les exploitants agricoles, leur famille et les consommateurs (Cissé, 1997 ; Thiaw, 2006 ; El rhazi, 2007). L'étude de Cissé (1997) a révélé que pour des mesures régulières de différentes d'eaux d'irrigation, les eaux de barrage sont moins polluées en coliformes fécaux que les eaux usées de l'abattoir et du canal central.

1.2.1. Contexte de l'agriculture urbaine à Kossodo

En Afrique subsaharienne, les traitements des eaux usées sont généralement limités au stade secondaire et l'un des procédés les plus utilisés est le lagunage naturel qui consiste à faire circuler l'eau usée en écoulement laminaire à travers trois bassins (anaérobie, facultatif et de maturation) disposés en série. Cette méthode est préconisée dans les pays où l'énergie solaire est abondante et de grands espaces encore disponibles (Hosetti *et al.*, 1995). Sur le site de Kossodo, les maraîchers bénéficient de l'effluent d'une station d'épuration par lagunage des eaux usées et d'un aménagement des parcelles agricoles, mais force est de constater que malgré les efforts déployés par les autorités pour le traitement des eaux à travers le Projet d'Amélioration des Conditions de Vie Urbaine (PACVU) pour fournir une eau d'irrigation de qualité, se pose le problème de qualité des eaux. Ces eaux seraient fortement contaminées et impropres aux cultures avec pour obligation des producteurs de ne produire que des cultures légumières consommables qu'après cuisson (Kaboré, 2006 ; Sou, 2009). Ces mêmes auteurs ont montré que ces eaux entraînaient la destruction de la structure du sol. La forte dégradation des sols liée à l'utilisation des eaux usées traitées peut être assimilée aux effets des rejets liquides de la zone industrielle vers la station de Kossodo (Sou, 2009). Le constat général sur la gestion des rejets industriels, solides et liquides, est que ces effluents n'obéissent pas aux normes nationales en vigueur. Très peu d'industries disposent de systèmes efficaces de traitement de leurs effluents (Akouze, 2010).

Les observations sur le site de Kossodo ont relevé que le maraîchage se limite seulement à la culture de *Spinacia oleracea* (épinards), de *Hibiscus sabdarifa* (oseille), de *Corchorus olitorius* L. (boulvakan) et parfois du *Solanum melongena* (aubergine). Le nombre de maraîchers est passé d'environ 600 en 2006 à une douzaine en 2014. Malgré l'affectation des terres et de la présence pérenne de l'eau qui devrait maintenir les producteurs, le maraîchage est en pleine disparition.

Le Burkina Faso bénéficie de deux stations d'épurations des eaux usées, l'une située à Ouagadougou et l'autre dans la commune urbaine de Bobo Dioulasso. Celle de Bobo Dioulasso ne dispose pas d'un aménagement officiel d'un site maraîcher, mais des producteurs y sont installés illégalement en aval pour produire. Quant à la station d'épuration de Ouagadougou, elle est située dans le quartier Kossodo et fonctionnelle depuis 2004 avec un aménagement maraîcher situé en aval. Tout comme de nombreuses autres stations, la STEP de Kossodo présente de réelles difficultés d'épuration des eaux. Cela est lié en partie au coût élevé de l'entretien et au système, puisque le traitement se résume à un écoulement laminaire des eaux entre les bassins. A titre illustratif la station d'épuration du site de Sebkhia (Nouakchott) à proximité d'une zone industrielle montre les résultats d'une pollution bactérienne qui dépassent 73 fois la norme qui est de 1000 coliformes par 100 m L ; une salinité excédant les 800 mg/L, et un pH basique atteignant 12 (Koné, 2002).

1.2.3. Caractérisation des eaux usées traitées de Kossodo

Il est important de signaler que la station d'épuration de Kossodo traite des eaux usées urbaines constituées d'un mélange d'eaux usées domestiques et d'eaux usées industrielles. Les EUT de la station d'épuration de Kossodo sont toutefois plus basiques et présentent des niveaux de conductivité électrique 20 fois plus élevés que l'eau douce des barrages (Sou, 2009). Le faciès chimique des EUT est très bicarbonaté, sodique, avec une valeur du taux d'absorption du sodium (SAR) comprise entre 11 et 22 et une Alcalinité Résiduelle Calcique (ARC) positive dont la moyenne atteint 14,3 mmolc l⁻¹ (Sou, 2009). Le tableau 1 donne quelques caractéristiques chimiques des eaux usées de la station d'épuration de Kossodo.

Tableau 1: Paramètres chimiques des eaux d'irrigation de Kossodo

| Paramètres | Eaux usées traitées | | | Eaux de l'ONEA | | |
|--|---------------------|-------|-------|----------------|------|------|
| | Min. | Max. | Moy. | Min. | Max. | Moy. |
| pH | 8,1 | 9,0 | 8,6 | 6,2 | 8,8 | 7,9 |
| Ec ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | 1200 | 1800 | 1600 | 80 | 100 | 90 |
| Cl ⁻ (mmolc l ⁻¹) | 0,19 | 4,47 | 2,14 | 0,12 | 0,28 | 0,18 |
| PO ₄ ³⁻ (mmolc l ⁻¹) | 0,01 | 0,72 | 0,44 | nd | nd | nd |
| Alc (mmolc l ⁻¹) | 11,30 | 20,86 | 15,17 | 0,27 | 1,15 | 0,87 |
| NH ₄ ⁺ (mmolc l ⁻¹) | 0,33 | 0,98 | 0,68 | 0,11 | 0,15 | 0,13 |
| Ca ²⁺ (mmolc l ⁻¹) | 0,63 | 1,05 | 0,84 | 0,16 | 0,57 | 0,38 |

Légende: nd : non détectable ; ONEA : Office National de l'Eau et de l'Assainissement

Source: Sou (2009)

1.2.4. Caractéristiques des sols des zones de maraîchage à Ouagadougou

La carte pédologique du Burkina Faso aux 1/500 000 coupures Centre Sud, rattache les sols de la région de Ouagadougou à la catégorie « lithosols sur cuirasses ferrugineuses et sols ferrugineux tropicaux remaniés sur matériaux argilo-sableux en profondeur » (Alboucq, 1968 cité par Sou, 2009). Selon Lompo *et al.*, (2009) ces sols ont leur structure très fragile et leur processus de formation conduit à des argiles essentiellement de type 1/1, notamment de la kaolinite, caractérisée par une faible réactivité. Une étude morphopédologique de la province du Kadiogo (BUNASOLS, 1998) caractérise les sols de nos sites ainsi qu'il suit:

Site de Kossodo : les sols ferrugineux tropicaux indurés peu profonds y dominant avec des inclusions de sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés superficiels. Le site de Kossodo est également caractérisé par une texture limoneuse argileuse sableuse sur l'horizon 0-17 cm (Diarra, 2008).

Site de Wyalghin : les sols ferrugineux tropicaux indurés peu profonds y dominant avec des inclusions de sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés superficiels.

Site de Boulmiougou : les sols hydromorphes à pseudogley d'ensemble dominant avec des inclusions de sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes.

1.2.5 Impacts des eaux usées sur la fertilisation et sur les rendements des cultures

1.2.5.1. Valeur fertilisante des eaux usées

La réutilisation des eaux usées est une source d'éléments fertilisants du fait qu'elles possèdent de hautes valeurs nutritives qui améliorent la croissance des plantes et augmentent la productivité des cultures (Kiziloglu, 2008). Elles constituent également une source d'amendement pouvant réduire l'utilisation des engrais chimiques et par conséquent le coût des intrants agricoles si ces eaux sont bien traitées (Thaw, 2006). En effet, les eaux usées (épurées ou non) contiennent en proportions très variables des substances nutritives (azote, phosphore, potassium, oligo-éléments, zinc, bore et soufre) pour les végétaux. On considère généralement que le traitement réduit la majeure partie des éléments nutritifs si bien que les agriculteurs préfèrent les eaux usées non traitées aux eaux usées traitées utilisées comme source d'irrigation (Quadir *et al.*, 2011). Mais tout de même les eaux usées traitées peuvent posséder des teneurs en NPK qui dépassent les besoins des cultures. . Ainsi une lame d'eau de 100 mm peut apporter à l'hectare :16 à 62 kg d'azote, 2 à 69 kg de potassium, 4 à 24 kg de phosphore, 18 à 208 kg de calcium, 9 à 100 kg de magnésium, et 27 à 182 kg de sodium (Faby *et al.*, 1997).

Dans certaines circonstances, ces éléments peuvent être en excès par rapport aux besoins des végétaux et provoquer des dommages en retardant la maturité ou en réduisant la qualité des cultures irriguées, et aussi bien constituer une source potentielle de pollution des eaux de la nappe (Belaid, 2010 ; Wikiwater, 2012). Au regard de cette situation, la FAO (2003) préconise l'analyse de l'eau au moins une fois en début de la saison culturale.

1.2.5.2. Impacts des eaux usées sur les rendements agricoles

L'irrigation avec les eaux usées traitées ou non de type domestique ou industriel influe différemment sur les rendements des cultures en fonction des caractéristiques de ces eaux. Plusieurs études ont montré l'effet bénéfique de l'utilisation des eaux usées sur les rendements des cultures (Wima, 2002; Manios *et al.* 2006; Ryan *et al.*, 2006 ; Sou, 2009).

L'irrigation avec les eaux usées peut augmenter la productivité des rendements agricoles de 100 % à 400 % et permettre la pratique de certaines cultures dans des régions où les conditions environnementales ne sont pas favorables (Wikiwater, 2012).

L'étude de Ryan *et al.*, (2006) dans la région du Moyen Orient, a mis en évidence l'effet bénéfique de l'utilisation des eaux usées sur les rendements de cultures en même temps que l'apport adéquat des nutriments pour la croissance des plantes. Dans la même étude ils

montrent que les eaux usées fournissaient de façon efficiente les éléments majeurs (N P K) pour les besoins de la plante, il n'y avait pas de nécessité pour les producteurs d'apporter de l'engrais. Les conclusions de Manios (2006) ont montré que l'irrigation avec les eaux usées qui ont subi un traitement primaire ainsi que les eaux fertilisées obtenaient de meilleurs rendements. En effet, des expérimentations sur la tomate ont montré que la tomate se développait rapidement et produisait de grandes quantités de feuilles et de tissu par rapport à l'utilisation des eaux usées ayant subi un traitement secondaire, et à l'eau du barrage. Les suivis de Hounto (2000) montraient que sur le site expérimental de l'Ecole Inter états d'Ingénieurs de l'Equipement Rural (EIER) la réutilisation de l'effluent traité pour l'irrigation de la tomate pouvait produire un excédent de rendement de 10 t/ha par rapport aux parcelles témoins irriguées avec l'eau de barrage. Sur ce même site Wima (2002) a obtenu une augmentation de rendement de culture de 80% pour les eaux usées traitées par rapport aux eaux témoins (eaux de l'ONEA).

Cependant l'irrigation des eaux usées traitées peut présenter des effets néfastes quant à la croissance des plants. L'étude de Sou (2009) sur deux (02) années consécutives de mesure des rendements d'aubergine a montré que l'irrigation avec les eaux usées traitées de la station d'épuration de Kossodo pendant la première année a permis une meilleure croissance des plantes d'aubergine par rapport à celles irriguées avec les eaux conventionnelles (eau de l'ONEA). Par contre au cours de la deuxième année d'irrigation avec les eaux usées traitées, les plantes d'aubergines présentaient des brûlures et jaunissements au niveau des feuilles par rapport à celles irriguées avec les eaux conventionnelles qui présentaient de meilleurs rendements. Ainsi les eaux usées traitées pourraient agir à moyen et à long terme sur les paramètres de croissance des plantes.

Pour la même expérience (Sou, 2009), les rendements des cultures irriguées avec les eaux usées traitées d'origine domestique de la station d'épuration de l'EIER étaient significativement supérieurs à ceux des cultures de la station d'épuration de Kossodo. En effet, les eaux d'irrigation d'origine industrielle sont fortement chargées en substances chimiques ; ce qui agirait négativement sur les rendements des cultures.

1.2.6. Impacts des eaux usées sur les paramètres chimiques des sols

D'une manière générale, les impacts des eaux d'irrigations varient en fonction du type de sol, de la qualité des eaux, du niveau de traitement, ainsi que des autres modes de gestion résultant des changements physiques, chimiques et biologiques des sols (Larson, 2010).

Plusieurs études ont montré l'effet bénéfique de l'irrigation des eaux usées sur les caractéristiques chimiques des sols (Manios *et al.* 2006 ; Ryan *et al.* 2006 ; Belaid, 2010 ; Laurenson, 2011).

1.2.6.1 Impacts des eaux usées sur la salinité des sols

Le problème de salinité des sols est un phénomène inhérent aux eaux usées brutes parfois aux eaux épurées. Ce problème ressort presque dans toutes les littératures traitantes de la réutilisation des eaux en culture maraîchère ou céréalière. C'est pourquoi une attention particulière doit être accordée au traitement des eaux et à leurs réutilisations.

La salinisation des sols est un processus d'accumulation excessive de sels solubles dans la partie superficielle des sols. Elle est généralement mesurée par la conductivité électrique à 25°C. Le phénomène de salinisation des sols est lié à une accumulation progressive des sels liée à la nature géologique du sol (salinisation primaire), et aux pratiques anthropiques telles que l'irrigation (salinisation secondaire) (Sou, 2009). Ce phénomène est plus prononcé dans les régions tropicales dues à une forte évaporation et à une concentration des éléments minéraux. Lorsque les eaux usées sont valorisées en irrigation, d'autres paramètres entrent en considération : le SAR (Ratio du Sodium Absorbable) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échanges dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium échangeables. Généralement, le SAR et la conductivité électrique de l'eau destinée pour l'irrigation, sont utilisés en combinaison afin d'évaluer le risque potentiel de salinisation des sols (Belaid, 2010).

La FAO (2003) considère qu'une eau est de très bonne qualité pour l'irrigation si la salinité est inférieure à $250 \mu\text{S cm}^{-1}$ et toutefois convenable si elle atteint jusqu'à $750 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Cependant, elle présente des problèmes de salinisation légers à modérés si elle est comprise entre 750 et $3000 \mu\text{S cm}^{-1}$, et qu'au-delà on a une dégradation inéluctable du sol et des rendements.

Pour une irrigation avec une eau de salinité élevée, la FAO (2003) préconise la culture d'espèces tolérantes ayant une forte capacité d'absorption de sels sans subir d'effets toxiques aux plantes. De ce fait une salinité inférieure à 3 dS m^{-1} et une bonne gestion, permet la production de la plupart des fruits et des légumes (carottes, oignons, haricots, poivrons, fraises et maïs). Si le choix de la culture est bien adapté aux problèmes de qualité des eaux, l'irrigation avec des eaux salines n'a aucun effet significatif sur les rendements

des cultures comme le montre Belaid (2010) qui n'a observé aucune chute régulière de rendements.

Pour pallier le problème de salinité des sols, Rhoades (1984) cité par Mitchell *et al.* (2000) propose dans son étude en Californie une rotation des eaux salines avec celles non salines et une sélection de différentes variétés tolérantes à la salinité.

1.2.6.2. Incidence de l'eau d'irrigation sur la concentration en sel

Le risque de dégradation de la fertilité des sols dépend de la concentration totale de sels contenus dans les eaux et de la composition des sels en relation avec la concentration en Na^+ . Aussi, le degré de salinité des sols dépend des systèmes d'irrigation (mode, dose et fréquence d'irrigation). Belaid (2010) explique qu'une dose supérieure aux besoins du sol est favorable à une lixiviation (lessivage) des sels ce qui permet de maintenir la salinité du sol à un niveau raisonnable surtout si le drainage interne et externe est convenable. Heidarpour *et al.* (2007) montrent qu'une irrigation de surface entraîne une augmentation de la conductivité électrique en profondeur par la lixiviation des sels par rapport à une irrigation en subsurface, qui provoque une remontée capillaire des sels en surface suite à l'évapotranspiration; ce qui augmenterait la conductivité électrique dans les horizons de surface.

1.2.6.3. Effets des eaux usées sur la vitesse d'infiltration et la capacité de rétention de l'eau

La présence d'une forte teneur en sodium et une faible teneur de calcium dans le sol ou dans l'eau réduit la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol de sorte qu'elle ne peut s'infiltrer en quantité suffisante pour satisfaire les besoins des plantes entre deux arrosages. De ce fait le prolongement de l'irrigation pendant un long temps conduit souvent à la formation de pellicules noires, au pourrissement des graines et à l'état médiocre des cultures (Compaoré 1998; Diarra, 2008). Cucci *et al.* (2011) ont montré que l'apport de solutés dans les eaux usées pendant la première année, a causé une réduction de taille des pores, en raison de la compaction des sols et de la salinité de l'eau, le volume d'eau de drainage était faible. Quant à la deuxième année, lorsque les concentrations en sel des eaux ont été plus élevées que celles de la première année, les volumes d'eau de drainage ont augmenté par rapport à l'exigence de lixiviation appliquée.

Le volume d'eau de drainage varie en fonction des quantités de solutés apportés et de la concentration en sels présents dans les eaux usées. Ces résultats pourraient s'expliquer soit

par une réduction de la macroporosité par accumulation des éléments minéraux, soit par une dispersion des argiles limitant ainsi la circulation de l'eau.

L'étude de Roberta *et al.*, (2010) sur la distribution de la taille des pores dans les sols irrigués avec de l'eau et des eaux usées sodiques indique que les changements dans la distribution de la taille des pores modifient la rétention d'eau du sol. Ils concluent que la relation directe entre la distribution de la taille des pores et la teneur en eau du sol peut être définie comme suit:

La macroporosité contrôle la teneur en eau à saturation du sol et la microporosité contrôle la teneur en eau à la capacité au champ. Ainsi l'irrigation avec les eaux usées traitées et les eaux usées sodiques augmente légèrement la macroporosité (lixiviation suivie de floculation et formation de macro agrégats) et diminue la microporosité (Roberta *et al.*, 2010).

La principale cause de la modification de la porosité du sol pourrait être attribuée à la concentration de Na^+ contenu aussi bien dans le sol (Shainberg *et al.*, 1984) que dans les eaux d'irrigation qui entraînent la désagrégation de la structure du sol.

1.2.6.4. Phénomène de Sodisation des sols

Il est important de comprendre le phénomène de sodisation des sols irrigués ou non, avec les eaux usées. La présence d'un fort taux de sodium dans le sol dépend du type de sol notamment de la structure et de la composition chimique du sol. Par conséquent, un excès de sodium par rapport aux alcalino-terreux (calcium, magnésium) dans le complexe absorbant provoque une défloculation des argiles, une déstructuration du sol qui se traduit par une réduction de la perméabilité et de la porosité des couches superficielles du sol. L'eau d'irrigation stagne à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines (Djeddi, 2007).

Les sols sodiques riches en kaolinite sont particulièrement exposés au phénomène de dispersion qui est généralement atténué par les ions métalliques et la matière organique qui assurent un rôle de maintien des agrégats structuraux (Sou ,2009). Larson (2010) rajoute que ces phénomènes dépendent du type de sol. En effet, il explique que la plupart des sols dominés par des argiles smectiques ayant une structure en treillis de type 2:1 sont beaucoup plus sensibles à la dispersion induite par le sodium que les argiles de types 1:1 (kaolinite et illite).

La dispersion des argiles peut aussi être expliquée par la présence de certains ions dans le complexe absorbant. La probabilité de dispersion de l'argile en réponse à K^+ est considérablement plus faible par rapport à Na^+ , bien que l'accumulation de cations monovalents dans le sol ne soit pas souhaitable. De hautes valeurs en K échangeable est moins dommageable que la concentration équivalente en Na échangeables sur la structure du sol (Laurenson, 2011).

Pour mesurer la sodicité d'une eau, on utilise le SAR (Sodium adsorption Ratio) ou le coefficient d'adsorption du sodium qui est une mesure de la quantité de sodium par rapport à la quantité de calcium et de magnésium dans l'eau ou dans l'extrait de sol saturé. Il traduit la propriété qu'a une eau de modifier la proportion des cations échangeables d'un sol et en particulier la proportion du sodium, quand elle est mise en contact prolongé avec le sol (irrigation, inondation). Le rapport (en pourcentage) du sodium échangeable aux autres cations échangeables dans le sol (PSE) est souvent utilisé pour déterminer la quantité de sodium échangeable.

$$SAR = [Na] / [(Ca+Mg) / 2]^{1/2}$$

$$PSE = 100 [Na] \text{ Echangeable} / \Sigma \text{ Cations Echangeables}$$

1.2.6.5. Augmentation du pH des sols

Concernant l'impact de l'utilisation des eaux usées sur les paramètres physico-chimiques du sol, Djeddi (2007) a trouvé une élévation du pH des sols avec l'utilisation des eaux usées, elle est peut-être due à la composition de ces eaux et à l'accumulation du calcium et du sodium. Ces résultats corroborent ceux de Denaix *et al.*, (2003) et Belaid (2010). En outre, la forte valeur du pH des sols de Kossodo semble être liée aux valeurs élevées de cet élément chimique dans les eaux usées de la STEP. Selon Rodier *et al.*, (2005), le pH est un élément important pour définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau. Il intervient dans des phénomènes complexes avec d'autres paramètres comme la dureté, le dioxyde de carbone, l'alcalinité et la température.

1.2.6.6. Effets des eaux usées sur les bases échangeables et la capacité d'échange cationique des sols

Dans les sols irrigués avec les eaux épurées de la station d'épuration de Sfax et dans les sols témoins en régions Tunisiennes, les résultats des analyses ont montré que la plupart des éléments échangeables excepté le calcium sont plus importants dans les sols irrigués

avec les EUT que dans les sols irrigués avec les eaux témoins (eaux de puits) (Belaid, 2010). Il montre ainsi l'importance des EUT et l'enrichissement du sol en ces éléments.

En outre, hors mis les situations de très forte teneur en calcium qui peuvent causer des dommages, le calcium issu de l'irrigation des eaux usées améliore la structure du sol et compense les effets négatifs des concentrations en sodium et en magnésium découlant de l'irrigation avec les eaux usées (Qadir *et al.*, 2011).

La CEC définit la propriété d'un sol à échanger les éléments minéraux (généralement c'est le calcium qui cède sa place). Dans les sols calcaires, elle est influencée par la présence plus ou moins importante de la matrice argileuse, de la matière organique et du calcium. Dans les sols acides, elle est influencée par l'aluminium et le fer (Anonyma, 2012). Concernant la CEC, elle est proportionnelle à la quantité de charges électriques portées par le complexe argilo-humique : plus la CEC est élevée, plus le sol peut adsorber et libérer des cations qui seront mis à la disposition des plantes. Elle dépend aussi de la nature des argiles et de leur association avec les composées humiques. Certains auteurs ont montré que l'irrigation des sols avec les eaux usées traitées peut conduire à une réduction de la capacité d'échange cationique. Le constat est que les sols irrigués avec les EUT ont entraîné une diminution de la CEC par rapport aux sols irrigués avec les eaux souterraines (Diarra, 2008 ; Kiziloglu, 2008).

1.2.6.7. Impacts des eaux usées sur la contamination des sols en métaux lourds

A Ouagadougou, les eaux usées sont d'origines domestiques et industrielles provenant essentiellement des grands centres administratifs, de l'hôpital Yalgado, de l'hôtel Silmandé, de la BCEAO, de la zone industrielle de Kossodo. A Kossodo, les rejets permanents de la brasserie et de la Tannerie vers la station d'épuration vont sans doute entraîner de forte teneur en métaux lourds dans les eaux d'irrigation et dans les sols. Le degré de contamination des sols en métaux lourds dépend de ses propriétés physico-chimiques (texture, pH, CEC, teneur en matières organiques, etc.), de la teneur et du type de métaux lourds présents dans les eaux d'irrigation. Il dépend aussi du temps durant lequel le sol a été soumis à des irrigations (Sou, 2009). Denaix *et al.*, (2003) ont trouvé que la concentration dans la solution du sol et sur les légumes diminue lorsque le pH augmente, quelle que soit la teneur du métal. Ces résultats ont été confirmés par ceux de Sou (2009) qui n'a révélé aucune augmentation des métaux lourds sur des légumes irrigués avec les eaux d'origine principalement industrielle. Ces résultats pourraient être expliqués par la

basicité des effluents et par les phénomènes d'antagonisme entre le pH et les concentrations en métaux lourds.

1.2.7. Effets des eaux usées sur les caractéristiques biologiques des sols

Plusieurs études ont porté sur l'effet des eaux usées sur les caractéristiques physico-chimiques du sol. Cependant peu de littératures ont été traitées sur la microbiologie des sols surtout dans le contexte sahélien, ce qui conduit souvent à une variabilité des résultats en fonction des pays (pays du Nord ; pays du Sud), des niveaux de développement, de l'origine des effluents et du niveau de traitement de ces eaux.

L'irrigation avec les eaux usées modifient les propriétés biochimiques telles que la biomasse microbienne, l'activité respiratoire, l'activité enzymatique. Speir (2002) cité par Da Fonseca *et al.*, (2007) a montré que les paramètres biologiques sont hautement sensibles au changement d'environnement mais surtout dans la composition et dans les quantités d'eaux usées utilisées, ce qui affecte la diversité génétique des microorganismes des sols. L'effet des eaux usées peut être bénéfique sur la microbiologie du sol par la présence des substances nutritives contenues dans les eaux usées. Ces microorganismes peuvent directement transformer les substances organiques et inorganiques et les mettre à la disposition des plantes. En outre, la quantité de microorganismes contenue dans le sol après irrigation est significativement corrélée avec la quantité de substances organiques contenues dans le sol (azote ammoniacal, azote total et phosphore disponible) (XU De-lan1, 2012). Ce dernier a mis en évidence les différentes corrélations : bactéries et substances organiques, actinomycètes et phosphores total, azotobacter et azote ammoniacale. Toutefois XU De-lan1 (2012) montre que l'irrigation à long terme peut conduire à une décroissance de la biomasse microbienne, à une récession de la communauté et à une baisse de la diversité entraînant malheureusement un désordre dans la structure et dans la fonction du sol.

CHAPITRE 2: MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Matériels

2.1.1 La zone d'étude

Ouagadougou, capitale du Burkina Faso est située au centre du pays entre les parallèles 12°20' et 12°25' de latitude Nord et les méridiens 1°27' et 1°35' de longitude Ouest. Elle est subdivisée en 52 secteurs appartenant à 12 arrondissements composant la Commune de Ouagadougou. La ville de Ouagadougou bénéficie d'un climat tropical de type soudano-sahélien caractérisé par deux saisons : une saison sèche d'octobre à avril, et une saison pluvieuse de mai à Octobre (6 mois). Elle est marquée par une pluviométrie moyenne annuelle de 800 mm d'eau recueillie par an (Kiba, 2012). D'après les études du BUNASOLS, on distingue quatre types de sols dans la province du Kadiogo qui régit la ville de Ouagadougou. Ce sont les sols minéraux bruts, les sols peu évolués, les sols à sesquioxydes de fer et/ou de manganèse et les sols hydromorphes. Dans la commune de Ouagadougou l'agriculture urbaine se répartie en deux grands secteurs d'activités agricoles:

Le maraîchage et l'horticulture. Le maraîchage en est l'activité principale et occupe le plus grand nombre de sites de production. Kedowidé et al. (2010) ont recensé une dizaine de sites maraîchers importants notamment celui de Boulmiougou, Bika, Tampouy, Kilwin, Kossodo, Tanghin, Wayalghin, Paspanga, Bogtoega et Ouidtenga qui couvrent à eux seuls presque 70 % des superficies cultivées. Cette agriculture urbaine mobilise d'énormes ressources en eaux qui sont diversifiées et se localisent essentiellement le long des barrages ou retenues d'eau, des marais, des puits ou forages, des eaux usées situées le long des canaux de drainage et des stations d'épuration. D'une manière générale ces ressources en eaux sont fonction de la répartition spatiale des sites et proviennent soit des eaux usées (traitées ou non), soit des eaux conventionnelles (eau de barrage, de puits, de marigot, etc.)

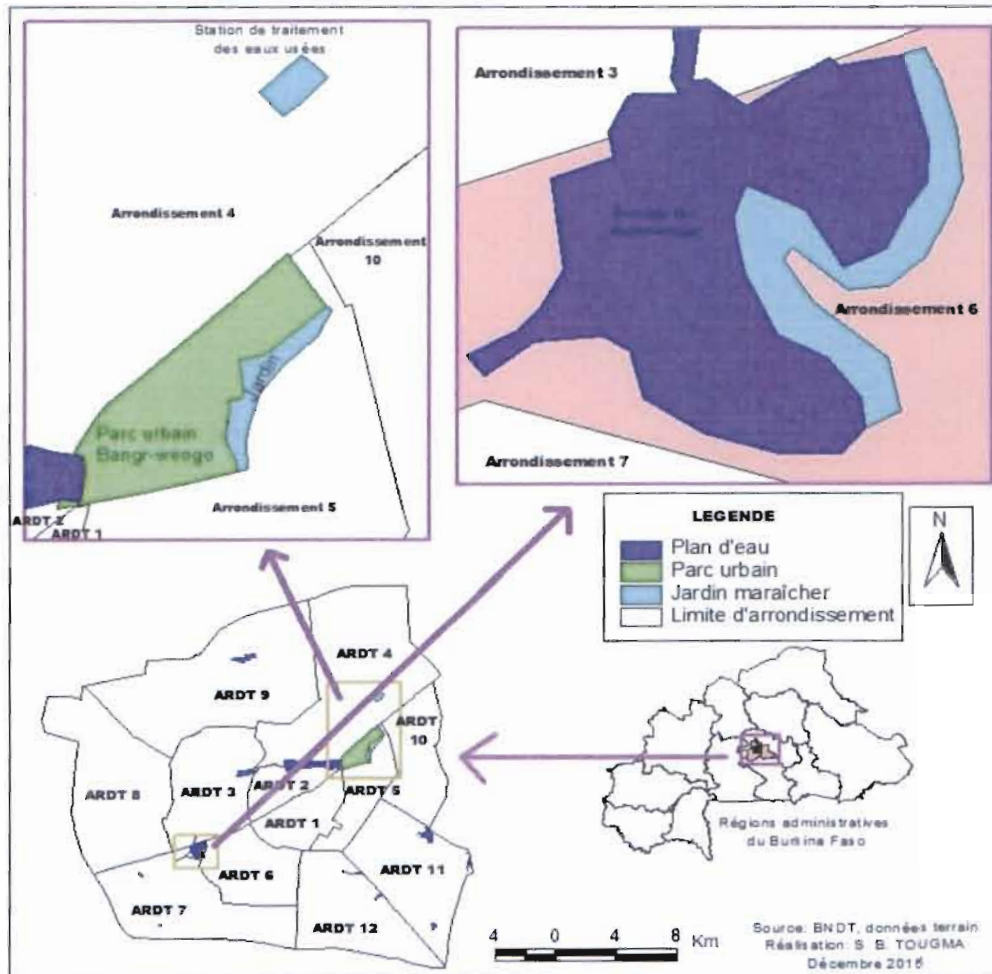


Figure 1: Carte administrative de la Commune de Ouagadougou, Source: Tougma S Bernard (2014)

2.1.2. Les sols

Les sols utilisés pour les analyses au laboratoire sont ceux provenant des différents sites maraîchers étudiés. Il s'agit des sols de Kossodo, de Wyalghin et de Boulmiougou. Au total six (06) échantillons ont été analysés par site de maraîchage.

2.1.3 Les eaux d'irrigation

Les eaux d'irrigations sont celles provenant des différents sites maraîchers. Il s'agissait des eaux usées de la station d'épuration de Kossodo, de celles du canal central pour le site de Wyalghin et des eaux du barrage pour le site de Boulmiougou.

2.2. Méthodes

2.2.1. Démarche globale de l'étude

En tenant compte de l'objectif de l'étude, nous avons adopté une approche consistant à sélectionner dans la ville de Ouagadougou trois sites maraîchers utilisant différents systèmes maraîchers. Ainsi, chaque site maraîcher était caractérisé par chaque système de maraîchage. Nous avons ensuite prélevé des échantillons de sols et d'eaux sur ces sites, que l'on a analysés au laboratoire.

2.2.2. Choix des sites maraîchers

Le choix des sites a été fait en tenant compte des systèmes de maraîchage utilisés et de la qualité des eaux utilisées pour l'irrigation. En effet, le choix de la qualité des eaux d'irrigation a prévalu pour le choix des sites par rapport aux autres facteurs du système de maraîchage. C'est ainsi que trois qualités d'eaux d'irrigation ont été considérées respectivement pour trois sites maraîchers. Ce sont les eaux usées non traitées (EUNT), les eaux usées traitées (EUT) et les eaux de barrage. En fonction de ces qualités d'eaux, les trois sites maraîchers ont été choisis à savoir le site maraîcher aménagé de Kossodo qui utilise uniquement les EUT, le site de Wayalghin dont la source d'eau d'irrigation est surtout constituée des EUNT et enfin le site de Boulmiougou utilisant exclusivement les eaux du barrage.

2.2.3. Présentation des sites maraîchers sélectionnés

2.2.3.1. Site de Kossodo

Le site maraîcher de Kossodo a été mis en place en 2006 grâce au Plan Stratégique d'Assainissement de la ville de Ouagadougou (PSAO) et le projet d'Amélioration des Conditions de Vie Urbaines (PACVU). Ce site est situé à proximité d'une zone industrielle dans le quartier de Kossodo à la périphérie Nord-Est de Ouagadougou (Figure 1). Il est localisé près d'une station d'épuration (STEP) par lagunage à microphytes couvrant un vaste site maraîcher de 35 hectares, prévu pour valoriser les eaux usées traitées. Le site compte 430 parcelles bornées avec des dimensions d'environ 9m x18m par unité parcellaire. Sur chaque parcelle est aménagée une rigole reliée au canal principal par un canal secondaire. Le site est équipé de puits de rigoles qui constituent la principale source d'eau pour les maraichers (Sou, 2009). Les sols du site de Kossodo d'une manière générale présentent une texture limono-sableuse.

2.2.3.2. Site de Wayalghin

Le site de Wayalghin situé dans le sous bassin versant du Massili, s'inonde en saison pluvieuse. Il utilise les eaux usées provenant de la ville, celles issues de nombreuses activités de la zone périphérique, ainsi que les eaux provenant du canal central qui traversent toute la forêt classée « Bangr Wéogo » pour se jeter dans le Massili. Le site est situé dans l'arrondissement n° 5 de la ville de Ouagadougou (Figure 1) longeant le parc urbain « Bangr Wéogo». Les exploitants affirment que l'eau du canal central est pérenne et qu'elle est favorable aux cultures. Le site compte environ plus d'une cinquantaine de producteurs occupant illégalement plus de cinq (05) ha de terre non aménagées officiellement. Une analyse récente des sols de Wayalghin au BUNASOLS (2015) a montré que ces sols ont une texture sablo-limoneuse (63 % de sable, 22 % de limon et 14 % d'argile)

2.2.3.3. Site de Boulmiougou

Le site de Boulmiougou est situé à l'Ouest de la ville de Ouagadougou dans l'arrondissement 5 (Figure 1) dont il porte le nom. Situé sur l'axe Ouagadougou-Bobo Dioulasso à environ 5 km de la marie centrale de Ouagadougou, il est divisé par la route nationale N°1 en deux parties: une partie au Nord (à droite en allant à Bobo), et l'autre partie au sud (à gauche en allant à Bobo). La superficie exploitée est estimée à environ 10 ha et le nombre de maraîchers qui s'y trouvent est de 200 en moyenne en saison sèche, période où l'eau du barrage devient une ressource. Les sols de ce site ont une texture de type limono-argileux avec une prédominance en argile.

2.2.4. Caractérisation des sites étudiés

La caractérisation des différents sites a concerné les différentes spéculations présentes, la qualité de l'eau d'irrigation et le type de fertilisation utilisé. Pour ce faire, des entretiens individuels ont été faits avec des producteurs de chaque site, complétés par des observations directes. Le nombre de producteurs enquêtés a été en fonction de notre objectif premier qui est de comparer l'impact de trois systèmes de maraîchage utilisant respectivement trois qualités différentes d'eaux d'irrigation sur les caractéristiques des sols. Pour cela, le choix de six (06) producteurs par site devrait permettre de couvrir la variabilité spatiale des sites étudiés. C'est dans ce sens que des producteurs ont été identifiés et des entretiens ont été réalisés avec pour objectif de collecter des informations durant trois années consécutives (2011, 2012 et 2013) sur :

- ✓ la pratique culturale,
- ✓ la caractérisation de la fertilisation,
- ✓ la source et la qualité de l'eau d'irrigation.

2.2.5. Choix des parcelles de producteurs pour les prélèvements de sol

Le choix des parcelles de producteurs a été fait de manière à couvrir la variabilité spatiale du site. Pour ce faire, sur chaque site nous avons choisi six (6) parcelles de producteurs, chaque parcelle correspondant à une répétition. Ainsi nous avons six répétitions par site. Le choix des parcelles proprement dit reposait sur les critères suivants :

✓ La volonté du producteur à collaborer :

La collaboration du producteur a été l'un des critères fondamentaux qui ont sous-tendu ce choix.

✓ La durée d'utilisation de la source d'eau d'irrigation :

Chaque parcelle avait exclusivement reçue la même qualité d'eau d'irrigation durant une période d'au moins sept ans pour voir l'impact éventuel de 7 ans d'irrigation sur les sols.

✓ La date de la dernière fertilisation :

Chaque parcelle n'avait pas été fertilisée nouvellement ou durant une période d'au moins 01 mois. Cela permettrait de limiter les effets conjoints et immédiats de la fertilisation.

✓ Le type de fertilisant utilisé :

Pour permettre de réduire l'effet de la fertilisation sur la qualité des sols, nous avons choisi d'harmoniser le type de fertilisant en favorisant le choix des parcelles qui ont utilisé le fumier et l'urée.

2.2.6. Méthode de détermination de l'impact de différents systèmes maraîchers sur les paramètres chimiques et biologiques des sols

2.2.6.1. Méthodes d'échantillonnage des sols et des eaux d'irrigation

2.2.6.1.1. Méthode échantillonnage des sols

L'échantillonnage des sols a été fait de manière à couvrir la variabilité spatiale de chaque parcelle de production. Ainsi au niveau de chaque planche de production généralement homogène sur chaque site, trois (3) échantillons de sol ont été prélevés sur l'horizon de surface (0-20 cm) à la tarière puis mélangés pour constituer un échantillon composite de

sol par parcelle. Ces sols ont été ensuite séchés, tamisés à la maille de 2 mm et conservés à 4°C avant leurs analyses au laboratoire.

2.2.6.1.2. Méthode d'échantillonnage des eaux d'irrigation

L'échantillonnage a été fait sur chacun des sites en prélevant les échantillons au nombre de trois (03) en fonction de la répartition spatiale des sites. Sur le site de Kossodo, le premier prélèvement a été fait à la sortie des bassins de maturation et les deux autres ont été réalisés dans les rigoles d'eaux usées illustrées par la Photo 6. A Wayalghin tous les prélèvements ont été effectués dans les rigoles d'eaux usées non traitées (Photo 2) distantes les unes des autres en fonction de la superficie considérée (quelques centaines de mètres). A Boulmiougou compte tenu de l'utilisation à la fois de l'eau des puits environnants et directement de celui du barrage, deux (02) prélèvements ont été faits dans ces puits et l'autre prélèvement dans l'eau du barrage. Pour tous les prélèvements, nous avons fait le choix de les réaliser au maximum à proximité des parcelles de prélèvement des sols et de déterminer la qualité directement dans la source d'irrigation. Les bidons ayant servi aux prélèvements, de contenance 1/4 de litre ont été préalablement stérilisés afin de détruire d'éventuels microorganismes. Les échantillons d'eau sont ensuite refermés et conservés dans des glacières et envoyés au laboratoire pour analyse.

2.2.6.2. Paramètres étudiés et méthodes de détermination

2.2.6.2.1. Paramètres chimiques des eaux

✓ pH

✓ Le pH des eaux a été déterminé à l'aide d'un pH-mètre à lecture directe à 25°C.

✓ Conductivité électrique

La conductivité électrique est mesurée à l'aide d'un conductimètre équipé d'un dispositif de correction de température qui permet une lecture directe à la température de référence de 20°C (Rodier et al., 1996). La conductivité est exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C.

✓ Nitrates et phosphores

L'analyse des nitrates et des phosphores est basée sur le principe d'un dosage photocolorimétrique des ions N-NO_3^- et PO_4^{3-} en présence de leur réactif. Le matériel utilisé pour leur mesure est constitué du spectrophotomètre.

✓ **Bases échangeables**

Le sodium et le potassium ont été dosés directement au spectrophotomètre à émission de flamme. Le calcium et le magnésium ont été mesurés par spectromètre à absorption atomique.

2.2.4.2.2. Paramètres chimiques des sols.

✓ **pH des sols**

Le pH des sols a été mesuré par la méthode électrométrique au pH-mètre. Le rapport sol/solution utilisé est de 1/2,5 selon les normes Afnor (1981). On pèse 20 g de sol dans un flacon et on ajoute 50 ml d'eau distillée. Après 1 heure d'agitation, le pH de la solution est obtenu par lecture directe sur le pH-mètre. A cette solution, on a ajouté ensuite 3,74 g de KCl afin de déterminer le pH KCL.

✓ **Carbone total**

Il a été déterminé par la méthode Walkley-Black (1934) pour le sol et qui consiste en une oxydation à froid du carbone du sol avec du bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) 1N en présence de H_2SO_4 concentré. L'excès du bichromate est dosé par du sel de Mohr $Fe(SO_4)_2(NH_4)_2$ en présence d'indicateur coloré. Le pourcentage de matière organique (MO) est donné par l'expression suivante:

$$MO (\%) = Co (\%) \times 1,724$$

✓ **Azote total**

La minéralisation de l'azote a été faite selon la méthode de Kjeldhal. Il s'agit d'une attaque acide H_2SO_4 concentré en présence de catalyseur au sélénium et de H_2O_2 , ce qui convertit l'azote organique en sulfate d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$. L'ion (NH_4^+) ainsi formé est dosé par colorimétrie automatique au SKALAR, dont le principe est fondé sur la réaction modifiée de Berthelot : l'ammonium est chloré en chlorure d'ammonium qui réagit avec le salicylate pour former le 5-amminosalicilate. Après oxydation par couplage il se forme un complexe vert dont l'absorbance est mesurée à 660 nm.

✓ **Phosphore total**

La minéralisation est identique à celle de l'azote total. Le dosage est fait par colorimétrie automatique au SKALAR. Le molybdate d'ammonium et le potassium antimoine tartrate réagissent en milieu acide avec l'acide ascorbique en formant un complexe coloré en bleu

en présence du P dont l'absorbance est mesurée à 880 nm. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de P dans le milieu.

✓ **Potassium total**

La méthode de minéralisation est identique à celle décrite précédemment. Le potassium est dosé par un spectrophotomètre à émission de flamme Jencons selon la méthode proposée par Walinga *et al.* (1989).

✓ **Conductivité électrique des sols**

La conductivité électrique des sols est mesurée sur la fraction du sol inférieure à 2 mm avec un rapport sol/solution 1/2,5 dans de l'eau distillée après une agitation pendant 2 heures selon les protocoles NF ISO11256.

✓ **Bases échangeables**

La détermination des bases a été faite selon la méthode Metson après une extraction des sols par une solution d'acétate d'ammonium molaire à pH 7. Le K échangeable a été dosé au spectrophotomètre à émission de flamme Jencons. Le sodium, calcium et magnésium par absorption atomique Perkinelmer.

2.2.6.2.3. Paramètres biologiques des sols

✓ **Activité biologique**

L'activité biologique du sol a été évaluée par la mesure de la minéralisation du carbone en conditions contrôlées. Il s'agit d'un dosage du CO₂ par la méthode adaptée de celle décrite par (Dommergues, 1960). Dans un bocal en verre de capacité 1 litre, on a introduit 100 g de terre humidifiée aux 2/3 de la capacité maximale de rétention d'eau. Un bécher contenant 20 ml de NaOH 0,1N et un récipient contenant de l'eau environ (20 à 40 ml) ont été placés dans le bocal. Le CO₂ dégagé, est piégé par la soude, et dosé par titrations avec du HCl 0,1N en présence de phénolphtaléine, après précipitation préalable du carbonate de sodium par 2 ml de BaCl₂ à 3 %. L'incubation a duré 21 jours.

La quantité de CO₂ dégagé (C-CO₂) est donnée par la formule :

$$C-CO_2 \text{ (mg/100 g de sol)} = (V_{\text{blanc}} - V_{\text{échantillon}}) \times 2,2$$

V_{blanc} = nombre de ml de HCl N/10 utilisés pour les bocaux témoins,

$V_{\text{échantillon}}$ = nombre de ml de HCl utilisés pour les bocaux contenant l'échantillon de terre, le coefficient 2,2 signifie qu'à 2,2 g de CO_2 correspond 1 ml de HCl N/10 (DOMMERGUES, 1960)

✓ **Biomasse microbienne**

La détermination a été faite selon la méthode de Jenkinson et Powlson (1976) à partir d'échantillon de sols soumis à fumigation. La fumigation consiste, après homogénéisation de l'échantillon de sol, à déposer 100 g dans un dessiccateur contenant du chloroforme débarrassé de l'éthanol après plusieurs lavages à l'eau. A l'aide d'une pomme à vide, on crée un vide dans le dessiccateur en vue de saturer l'atmosphère par les vapeurs de chloroforme. Après 24 heures de fumigation les vapeurs de chloroforme ont été évacuées en effectuant 4 à 5 vides successifs.

Les sols fumigués et les contrôles sont ensuite mis à incuber dans un bocal à la température de 30°C en présence de soude comme dans la méthode précédemment décrite. Les dosages ont été effectués après 7 et 14 jours d'incubation.

La quantité de biomasse microbienne (CBM) est obtenue à partir de la formule de Fardoux et al., (2000):

$$CBM_{(mg/100\text{ g de sol})} = [F_{(0,7)} - F_{(7-14)}] / kc$$

$F_{0,7}$ est le CO_2 dégagé entre 0 et 7 jours par les échantillons fumigués ;

$F_{7,14}$ le CO_2 dégagé entre 7 et 14 jours par les échantillons fumigués ;

Kc est égale 0,41 coefficient proposé par Nicolardot (1984) cité par l'INSAH (2004).

✓ **Respiration spécifique (RS) ou quotient respiratoire**

La respiration spécifique est la quantité de carbone minéralisé par g de C-biomasse microbienne et par jour. Elle a été déterminée en utilisant la formule suivante (Chaussod et al., 1992) :

$$RS = Cm(14) / (14 \cdot C-BM) \text{ où :}$$

- Cm (14) est le carbone minéralisé pendant 14 jours d'incubation

- C-BM est la biomasse microbienne ; 14 est le nombre de jours d'incubation

- 14 est le nombre de jours d'incubation

2.3.Traitement des données

Les données ont été traitées par une analyse de variance et les moyennes comparées à l'aide du test de Fisher au seuil de 5 % à l'aide du logiciel GENSAT 9th édition. Les coefficients de corrélation entre les paramètres ont été déterminés par la méthode de régression simple à l'aide du même logiciel. Les graphes ont été réalisés avec le logiciel Excel 2007.

CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Caractéristiques des sites maraîchers étudiés

3.1.1.1. Site de Kossodo

Le Tableau 2 donne un aperçu sur les différents types de spéculations et de fertilisants utilisés sur le site de Kossodo. Sur ce site, la production maraîchère était essentiellement limitée à la culture de *Spinacia oleracea* (épinard), de *Corchorus olitorius L.* (boulvakan), rarement de *Hibiscus sabdariffa* (oseille) et de *Solanum melongena* (aubergine). Chaque année de production, 83 % des maraîchers enquêtés pratiquent la culture pure d'épinard contre seulement 17 % qui en plus du *Spinacia oleracea* (épinard) associeraient le *Corchorus olitorius L.* (boulvakan). La fertilisation est de type organique et minéral.

A Kossodo, 100 % des producteurs affirment avoir utilisé du fumier surtout celui des bovins et de l'urée pour amender leurs parcelles.

3.1.1.2. Site de Wayalghin

Le site de wayalghin du fait de sa proximité avec la forêt Bangr-Wéogo et du canal central qui le longe, bénéficie d'une source d'eau pérenne ce qui rend l'activité maraîchère permanente et intense, surtout en saison sèche. Les spéculations les plus rencontrées lors de nos enquêtes étaient entre autre *Amarantus caudatus L.* (amarante), *Lactuca sativa L.* (laitue) et *Brassica oleracea L.* (chou). La particularité de ce site est que l'amarante a été au moins cultivé une fois par la totalité des producteurs (100 %), cultivée en association ou en culture pure.

Les résultats des enquêtes ont montré que 50 % des producteurs ont cultivé ce légume feuille par année de production, pendant que 33,33 % des producteurs de ce site l'ont cultivée en association avec la laitue. Seize pour cent des producteurs ont cultivé le chou en association avec l'amarante durant chaque année de production. La fertilisation organique est constituée du fumier de bovin et des autres ruminants pour la quasi-totalité des producteurs enquêtés. A cela s'ajoute la fertilisation minérale constituée uniquement de l'urée utilisée par 100 % des producteurs. Le Tableau 2 illustre les spéculations et le type de fertilisation utilisé à Wayalghin.

3.1.1.3. Site de Boulmiougou

Boulmiougou, site maraîcher situé à proximité d'un barrage qui porte son nom, présente l'inconvénient d'être inondable en saison pluvieuse. Nos observations de terrain nous ont permis de constater une grande diversité de cultures. On y rencontre des cultures telles que *Lactuca sativa* L. (laitue), *Brassica oleracea* L. (chou), *Fragaria sp.* (fraise), *Daucus carota* (carotte), *Cucumis sativas* (concombres) *Pisum sativum* (petit pois), *Beta vulgaris* (betterave), l'aubergine. Une des particularités de ce site est qu'il a existé une large diversité culturelle; chaque producteur a sa spécificité. Le tableau 2 montre qu'il n'y a pas plus de 40% de producteurs qui ont cultivé la même spéculatation. Sur ce site la fertilisation organique (fumier surtout) et la fertilisation minérale (urée surtout) sont aussi pratiquées.

Tableau 2 : Caractéristiques culturelles des systèmes maraîchers des sites étudiés

| Sites | Caractéristiques culturelles | | % des enquêtés | | |
|--------------|------------------------------|----------------------|----------------|-------|-------|
| | | | Années | | |
| | | | 2011 | 2012 | 2013 |
| Kossodo | Types de spéculations | Epinard | 83 | 83 | 83 |
| | | Boulvakan | 0 | 0 | 0 |
| | | Epinard-boulvakan | 17 | 17 | 17 |
| | Fertilisants | Boulvakan | 100 | 100 | 100 |
| | | Urée | 100 | 100 | 100 |
| | | Fumier | 100 | 100 | 100 |
| Types d'eaux | Eaux de STEP | 100 | 100 | 100 | |
| Wayalghin | Types de spéculations | amaranthe | 50 | 50 | 50 |
| | | Amranthe-laitue | 33,33 | 33,33 | 33,33 |
| | | Amaranthe-chou | 16,67 | 16,67 | 16,67 |
| | Fertilisants | Fumier | 100 | 100 | 100 |
| | | Urée | 100 | 100 | 100 |
| | Types d'eaux | Eaux de canal | 100 | 100 | 100 |
| Boulmiougou | Types de spéculations | Fraise | 16,66 | 0 | 0 |
| | | Laitue | 0 | 0 | 16,66 |
| | | Chou | 16,66 | 16,66 | 0 |
| | | Gombo | 16,66 | 16,66 | 16,66 |
| | | Concombre | 16,66 | 33,32 | 16,66 |
| | | Tomate-laitue | 16,66 | 16,66 | 16,66 |
| | Fertilisants | Petit pois-betterave | 16,66 | 16,66 | 16,66 |
| | | Carotte-fraise | 0 | 0 | 16,16 |
| | | Fumier | 100 | 100 | 100 |
| | | Urée | 100 | 100 | 100 |
| Types d'eaux | Eaux du barrage | 100 | 100 | 100 | |

Légende : STEP : Station d'épuration

3.1.2. Caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation

Les résultats (Tableau 3) montrent que les eaux usées de la STEP de Kossodo ont présenté des teneurs en nitrates significativement supérieures ($P = 0,004$) à celles de Wayalghin et Boulmiougou qui ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ($P = 0,16$). Pour ce qui est de la teneur en ammonium les résultats ont révélé que les eaux usées traitées (Kossodo) ou non traitées (Wayalghin) ont des teneurs statistiquement équivalentes mais elles sont significativement plus élevées que celle du barrage de Boulmiougou (Tableau 3).

La teneur en phosphore contenu dans les eaux usées traitées est significativement plus élevée par rapport à celle contenue dans les eaux usées non traitées qui contiennent des teneurs en P significativement supérieures à celles des eaux du barrage (Tableau 3).

Les résultats du Tableau 3 ont montré que les teneurs en Na^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^{+} des eaux usées qu'elles soient traitées ou non sont largement supérieures ($P < 0,05$) aux teneurs des eaux du barrage. Les analyses ont aussi révélé que les eaux usées traitées possédaient des teneurs en cation nettement supérieures à ceux des eaux usées non traitées au seuil de 5% sauf le cas du Ca^{2+} et du Mg^{2+} .

Le pH des eaux issues de la station d'épuration de Kossodo est fortement basique par rapport aux pH des eaux de Wayalghin et du barrage qui sont acides ($P < 0,001$). Le pH des eaux du barrage est faible par rapport à celui de l'eau usée non traitée ($P = 0,02$) au seuil de 5%. Quant à la conductivité électrique des eaux, il n'y a pas de différence significative ($P > 0,05$) entre les eaux de Wayalghin et de Boulmiougou, mais l'analyse a montré que ces eaux diffèrent toutes significativement de celles de Kossodo au seuil de 5%. Les résultats ont également montré que la conductivité des eaux de Kossodo est 5 à 6 fois plus élevée que celles des autres eaux.

Tableau 3: Caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation des sites maraîchers étudiés

| sites | NO ₃ ⁻ | P | NH ₄ ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | pH | Ec (μS.cm ⁻¹) | SAR |
|--|------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| | mg.l ⁻¹ | | | | | | | | | |
| Kossodo (Eaux Usées Traitées) | 155,75 ^a | 7,50 ^a | 9,28 ^a | 356,09 ^a | 8,26 ^a | 1,53 ^a | 30,50 ^a | 9,46 ^a | 2926 ^a | 44,57 ^a |
| Wayalghin (Eaux Usées Non Traitées) | 31,61 ^b | 4,65 ^b | 10,10 ^a | 21,55 ^b | 19,34 ^b | 5,60 ^b | 12,33 ^b | 6,97 ^b | 399,33 ^b | 1,07 ^b |
| Boulmiougou (Eaux Barrage) | 13,22 ^b | 0,14 ^c | 0,30 ^b | 15,67 ^b | 5,63 ^a | 4,75 ^b | 8,33 ^b | 6,49 ^c | 415,33 ^b | 0,57 ^b |
| Lsd | 21,25 | 0,61 | 4,83 | 20,14 | 2,98 | 0,90 | 3,54 | 0,30 | 309,9 | 15,99 |
| Signification (5%) | *** | *** | ** | *** | ** | *** | *** | *** | *** | *** |

*Test de Fisher au seuil de 5% ; les valeurs sont des moyennes de 6 répétitions. Les valeurs suivies d'une même lettre dans la même colonne ne diffèrent pas significativement au seuil de 5%. ** ; *** : niveau de signification. ** : Hautement significatif (p < 0,01) ; *** : Très hautement significatif (p < 0,001)*

3.1.3. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur les caractéristiques chimiques des sols étudiés

Les résultats des analyses chimiques des sols sont consignés dans le tableau 4.

Les sols de Kossodo présentent des teneurs en azote total du sol (0,70 g/kg) significativement inférieures à celles des sols du site de Wayalghin et du site de Boulmiougou. Les teneurs en azote total des sols de Boulmiougou sont significativement inférieures à celles de Wayalghin.

Les résultats indiquent que quel que soit le site, il n'y a pas de différence significative au seuil de 5% ($P = 0,61$) entre les teneurs en phosphore total des sols. Mais les tendances montrent que la teneur en phosphore total des sols du site de Kossodo (306,7 mg/kg de sol) est supérieure à celle de Boulmiougou (305,2 mg/kg de sol) et de Wayalghin (291,5 mg/kg de sol).

Les teneurs en potassium total sont statistiquement équivalentes pour les sols des trois sites ($P = 0,17$) au seuil de 5%. Les fortes et les faibles teneurs en potassium total ont été enregistrées respectivement sur les sols de Kossodo (1,77 g/kg de sol) et de Wayalghin (1,42 g/kg de sol)

Les résultats des analyses chimiques montrent que les teneurs en carbone total (%) sur l'horizon 0-20cm sont de 0.69 % pour les sols de Kossodo et de 0.93 % (1.08 %). L'analyse de variance montre une différence significative entre les teneurs en C des sols des sites étudiés.

Le rapport C/N des sols des trois sites n'a pas varié significativement ($P = 0,30$).

L'analyse de variance a montré une différence significative ($P < 0.001$) entre le pH eau des sols des différents sites. En effet, le pH eau des sols varie respectivement de 9,56 à 5,03 en passant de 7,29 pour le site de Kossodo, Boulmiougou et Wayalghin. Les sols des sites de Kossodo et de Wayalghin sont alcalins par rapport aux sols de Boulmiougou qui sont acides. Le pH KCL des sols varie dans le même sens que le pH eau.

Tableau 4: Caractéristiques chimiques des sols des sites maraîchers de Kossodo, Wayalghin et Boulmiougou

| Sols | N (g/kg) | C (%) | P (mg/kg) | K (g/kg) | C/N | pH eau | pH KCl |
|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Sols Boulmiougou | 1,01 ^a | 0,93 ^a | 305,20 ^a | 1,71 ^a | 9,33 ^a | 5,53 ^a | 5,03 ^a |
| Sols Kossodo | 0,70 ^b | 0,69 ^a | 306,70 ^a | 1,77 ^a | 10,33 ^a | 9,56 ^b | 8,46 ^b |
| Sols Wayalghin | 1,07 ^a | 1,08 ^b | 291,50 ^a | 1,42 ^a | 10,50 ^a | 7,88 ^c | 7,29 ^c |
| <i>Lsd</i> | 0,28 | 2.25 | 35,94 | 0,41 | 1,68 | 0,52 | 0,99 |
| Signification (5%) | * | ** | NS | NS | NS | *** | *** |

*Test de Fisher au seuil de 5% ; les valeurs sont des moyennes de 6 répétitions. Les valeurs suivies d'une même lettre dans la même colonne ne diffèrent pas significativement au seuil de 5%. NS : Non Significatif ; * : Significatif ($p < 0,05$) ; ** : Hautement significatif ($p < 0,01$) ; *** : Très hautement significatif ($p < 0,001$)*

Les résultats du Tableau 5 montrent que pour les sols des sites de Boulmiougou, Kossodo et Wayalghin, les teneurs en magnésium (Mg^{2+}) n'ont pas significativement varié entre les sites, mais la teneur la plus élevée a été mesurée sur les sols de Wayalghin suivies de ceux de Boulmiougou. Cependant, pour ce qui est du taux en potassium et en calcium l'analyse de variance au seuil de 5% a montré une différence significative entre les différents sols. Le K^+ s'est révélé important avec une valeur de l'ordre de $0,89 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol pour ceux de Kossodo. Cette étude a montré que les sols de Kossodo sont plus riches en potassium que ceux de Wayalghin ($0,18 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol). Les teneurs en Ca^{2+} à Boulmiougou ($4,50 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol) et Kossodo ($6,18 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol) ne présentent aucune différence significative au seuil de 5%, mais diffèrent tous significativement de Wayalghin ($20,68 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol) qui présente des valeurs 3 à 4 fois supérieures que celles des sites précédents ($p < 0,01$; $Lsd = 5,47$).

Le constat est que les fortes teneurs en sodium contenues dans le complexe absorbant du sol ont été observées pour les sols de Kossodo avec une haute teneur du taux de Na^+ ($4,39 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol). Cette teneur est très significative ($P < 0,01$) et diffère de celle de Wayalghin ($0,59 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol) et de Boulmiougou ($0,27 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol) qui ne présente aucune différence significative. On retient que comparativement aux sols de Boulmiougou et de Wayalghin, le taux de Na^+ échangeable des sols de Kossodo a la plus grande teneur.

D'une manière générale l'analyse de variance au seuil de 5% a révélé que les systèmes maraîchers ayant pour source d'irrigation les eaux usées traitées ou non ont entraîné une hausse significative de la CEC par rapport à ceux issus de l'irrigation avec les eaux du barrage ($P < 0,05$). Ainsi des résultats issus des analyses ont montré que les valeurs de la CEC sont nettement plus élevées à Wayalghin ($12,74 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol) que sur tous les autres sites. Prises séparément, celle de Kossodo ($11,09 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol) est largement supérieure à la valeur mesurée sur le site de Boulmiougou ($6,50 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol), mais reste légèrement comparable à celle des sols de Wayalghin.

Les résultats présentés dans le Tableau 5 montrent que la conductivité des sols de Kossodo est significativement supérieure aux conductivités électriques des sols de Wayalghin et de Boulmiougou qui sont statistiquement équivalentes.

Tableau 5: Bases échangeables, CEC et Ec des sols maraîchers

| Sols | Bases échangeables ($\text{Cmol}^+ \text{Kg}^{-1} \text{sol}$) | | | | Σ Bases échangeables ($\text{Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$) | CEC ($\text{Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$) | Taux de saturation (%) | Ec $\mu\text{S cm}^{-1}$ |
|-----------------------|---|-------------------|--------------------|-------------------|--|---|------------------------------|-----------------------------|
| | Mg^{2+} | Na^+ | Ca^{2+} | K^+ | | | | |
| Sols Boulmiougou | 1,27 | 0,27 ^b | 4,50 ^a | 0,31 ^a | 6,34 ^a | 6,50 ^b | 99 ^{ab} | 195,3 ^a |
| Sols Kossodo | 1,08 | 4,39 ^a | 6,18 ^a | 0,89 ^b | 12,54 ^b | 11,09 ^a | 125 ^{ab} | 1247,3 ^b |
| Sols Wayalghin | 1,32 | 0,59 ^b | 20,68 ^b | 0,18 ^c | 22,78 ^c | 12,74 ^a | 186 ^a | 456,5 ^a |
| Lsd | 0,44 | 0,78 | 5,47 | 0,26 | 5,420 | 3,41 | 63,3 | 350,69 |
| Signification (5%) | NS | ** | ** | ** | ** | ** | * | ** |

*Test de Fisher au seuil de 5% ; les valeurs sont des moyennes de 6 répétitions. Les valeurs suivies d'une même lettre dans la même colonne ne diffèrent pas significativement au seuil de 5%. NS : Non Significatif * ; ** : niveau de signification. * : Significatif ($p < 0,05$) ; ** : Hautement significatif ($p < 0,01$)*

La figure 2 présente le taux d'absorption du Sodium (SAR) et le PSE (%) des sols d'étude. A Kossodo, le SAR des sols est fortement élevé et présente des valeurs 10 fois plus élevées que celui des sites de Wayalghin et Boulmiougou qui sont similaires statistiquement. Le pourcentage de sodium échangeable et le taux d'absorption du Sodium des sols des trois sites maraîchers présentent des résultats similaires et sont proportionnels. En effet, les résultats ont

montré une corrélation positive entre le PSE et le SAR des sols des différents sites maraîchers (Kossodo : $r \approx 0,99$; Wayalghin : $r \approx 0,97$ et Boulmiougou : $r \approx 0,90$).

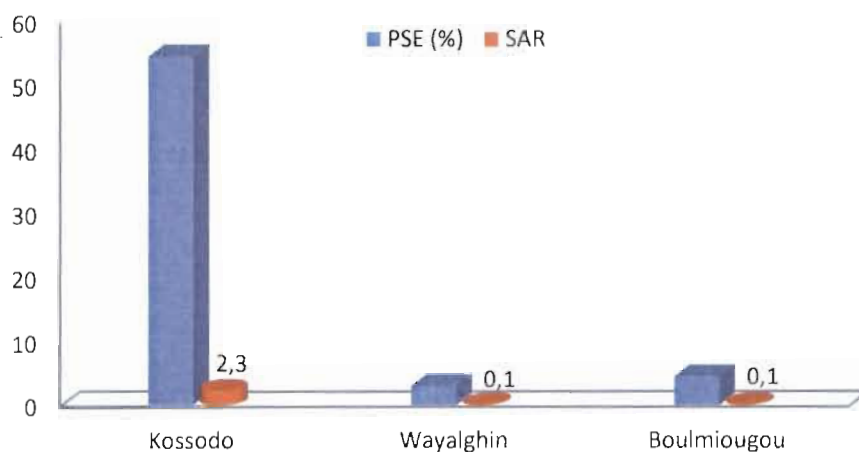


Figure 2: Taux d'absorption du sodium et pourcentage de sodium échangeable

3.1.4. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur la biologie des sols

3.1.4.1. L'activité microbienne des sols

La Figure 3 illustre le dégagement journalier du CO_2 durant 21 jours d'incubation pour les sols des différents sites.

Sur le site de Kossodo l'activité respiratoire a évolué en dent de scie avec une augmentation durant les deux (02) premiers jours d'incubation pour subir une baisse jusqu'au 5^{ème} jour ($0,11 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de sol) là où se situe la respiration minimale. Elle reprend ensuite à partir du 6^{ème} jour pour atteindre un pic le 17^{ème} jour ($0,17 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de sol) avant d'entamer une phase de décroissance jusqu'au 21^{ème} jour.

Quant au site de Wayalghin, l'activité respiratoire des sols a été intense, mais est restée décroissante durant les cinq (05) premiers jours d'incubations. Les quantités maximales produites ont varié de $0,25 \text{ mg de CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de sol à $0,09 \text{ mg de CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de sol du 1^{er} jour au 5^{ème}. Après 5 jours d'incubation on a noté une légère augmentation du CO_2 dégagé pour atteindre un pic le 15^{ème} jour pour ensuite décroître jusqu'au bout de l'expérimentation.

Sur le site de Boulmiougou, la courbe d'évolution du CO_2 dégagé présente deux (02) phases: une phase de décroissance du 1^{er} au 5^{ème} jour avec un dégagement maximal au 1^{er} jour

d'incubation, et une phase de croissance à partir du 6^{ième} jour qui tend à se stabiliser tout au long de l'expérimentation. La quantité maximale de CO₂ dégagé se situe au 15^{ième} jour d'incubation.

Des deux (02) sites maraîchers, celui de Wayalghin et de Boulmiougou, les résultats des analyses montrent que la quantité de CO₂ dégagée à Wayalghin est maximale pour les 2 premiers jours alors que sur le site de Boulmiougou le dégagement est faible. L'analyse de variance au seuil de 5% a montré qu'au 1^{er} jour d'incubation, le volume de CO₂ dégagé par les microorganismes des sols de Wayalghin est significativement différent de ceux de Kossodo et de Boulmiougou ($P < 0,01$; $Lsd = 0,021$). Cependant les sols de Kossodo et de Boulmiougou ne sont pas significativement différents. Au 5^{ième} jour où tous les dégagements semblent être au minimum, l'analyse n'a pas révélé une différence significative entre la respiration des sols du site de Kossodo ($0,114 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1}$ de sol) et de Wayalghin ($0,093 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1}$ de sol).

Pour tous les sites, le pic de dégagement du CO₂ se situe au 11^{ième} jour. Les résultats montrent une augmentation du volume journalier de gaz mesuré pour tous les sites du 7^{ième} au 15^{ième} jour. Cette augmentation est proportionnelle au temps et reste toutefois significativement différente les unes des autres du 8^{ième} au 15^{ième} jour ($P < 0,05$). Les résultats des analyses chimiques et biologiques ont montré une corrélation positive entre le carbone et l'intensité respiratoire pour les sites de Wayalghin ($r \approx 0,78$) et Boulmiougou ($r \approx 0,43$) et une corrélation négative ($r \approx -0,29$) pour celui de Kossodo.

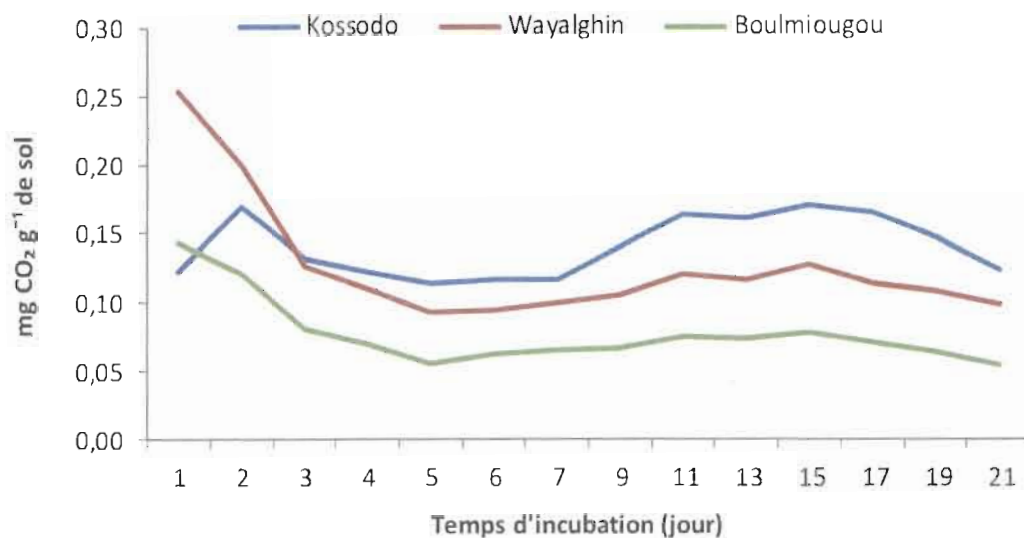


Figure 3: Evolution journalière du CO₂ dégagé des sols des sites maraîchers

3.1.4.2. Dégagement cumulé de CO₂ des sols

Les courbes de la Figure 4 représentent les quantités cumulées de CO₂ dégagé au cours du temps.

Les faibles dégagements de CO₂ ont été enregistrés avec les sols de Boulmiougou. Par contre avec les sols de Kossodo et de Wayalghin l'allure des courbes montrent un chevauchement au 9^{ième} jour de mesure. En comparant le dégagement cumulé entre les sites de Kossodo et Wayalghin où les dégagements sont au maximum, les résultats ont montré que de la 1^{ère} à la 9^{ième} mesure, la quantité cumulée de gaz carbonique dégagé au niveau des sols de wayalghin (1,202 mg CO₂.g⁻¹ de sol) est supérieure à celle de Kossodo (1,197 mg CO₂.g⁻¹ de sol) avec cependant une différence significative du 1^{er} au 5^{ième} jour. Au-delà du 13^{ième} jour la tendance s'inverse avec une importante activité respiratoire à Kossodo qui toutefois n'est pas significativement différente de celle de Wayalghin. Sur les sols des sites de Wayalghin et de Boulmiougou l'analyse a montré que la quantité cumulée de carbone à partir du 2^{ième} jour jusqu'au 21^{ième} jour est significativement différente. Il en est de même pour les sites de Kossodo et de Boulmiougou à l'exception du 2^{ième} jour d'incubation.

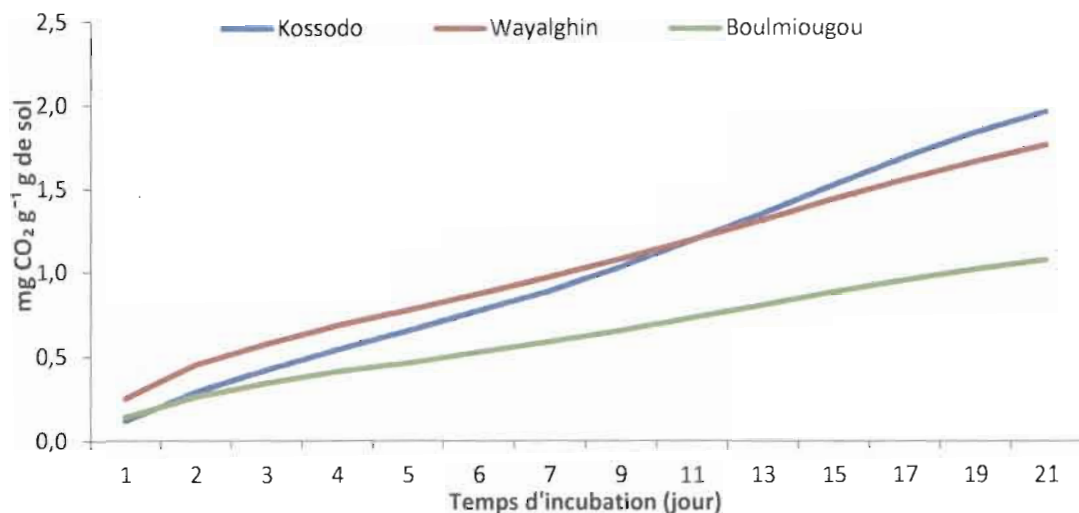


Figure 4: Evolution cumulée du CO₂ dégagé des sols des sites maraîchers

3.1.4.3. La biomasse microbienne des sols

Les résultats du Tableau 6 indiquent que le système de maraîchage utilisé à Kossodo n'a pas eu d'effets significatifs sur la biomasse microbienne des sols, par rapport à celui de Wayalghin. Quant au site de Boulmiougou les résultats ont montré que le système de maraîchage a entraîné une hausse de la biomasse microbienne par rapport aux autres. L'analyse statistique au seuil de 5% a révélé une différence significative de biomasse microbienne entre le site de Kossodo (0,4774 mg C.g⁻¹ de sol) et celui de Boulmiougou (0,5920 mg C.g⁻¹ de sol) et entre Kossodo et Wayalghin (0,5069 mg C.g⁻¹ de sol) avec (P < 0,05 ; Lsd= 0,090).

3.1.4.4. Quotient respiratoire des sols

Le Tableau 6 montre que le quotient respiratoire (qCO₂) a augmenté significativement sur les sols de Kossodo (0,29 mg C-CO₂ g⁻¹ C-Biom. Microb. J⁻¹) par rapport à ceux de Wayalghin (0,25 mg C-CO₂ g⁻¹ C-Biom. Microb. J⁻¹) et de Boulmiougou (0,13 mg C-CO₂ g⁻¹ C-Biom. Microb. J⁻¹) qui présentent les plus faibles ratios. Les résultats ont montré que les systèmes maraîchers avec les eaux usées comme source d'irrigation ont augmenté d'une manière générale le qCO₂ des sols, mais n'ont pas révélé une différence significative entre ces sols. Cependant Boulmiougou qui présente le plus faible quotient diffère significativement de celui de Kossodo et de Wayalghin à 5% de probabilité.

Tableau 6 : Biomasse microbienne et quotient respiratoire des sols maraîchers

| Sols | Biomasse microbienne(BM) (mg C.g ⁻¹ de sol) | Quotient respiratoire (qCO ₂) (mg C-CO ₂ g ⁻¹ C-Biom. Microb. J ⁻¹) |
|--------------------|---|--|
| Sols Boulmiougou | 0,592 ^a | 0,131 ^b |
| Sols Kossodo | 0,477 ^b | 0,298 ^a |
| Sols Wayalghin | 0,506 ^{ab} | 0,255 ^a |
| Lsd | 0,090 | 0,061 |
| Signification (5%) | * | ** |

Test de Fisher au seuil de 5% ; les valeurs sont des moyennes de 6 répétitions. Les valeurs suivies d'une même lettre dans la même colonne ne diffèrent pas significativement au seuil de 5%. * ; ** : niveau de signification. * : Significatif ($p < 0,05$) ; ** : Hautement significatif ($p < 0,01$)

3.2. Discussion

3.2.1. Caractéristiques des trois (03) sites de maraîchage

Les résultats des enquêtes et des observations de terrain ont montré que sur le site de Kossodo, l'activité maraîchère est en pleine régression. En effet, elle se résume essentiellement à la culture d'épinard et de "boulvakan" cultivés chacun en monoculture et / ou en association. Cet état de fait crée sans doute des problèmes de qualité du sol. Cela a été confirmé à travers nos observations sur le terrain qui montrent une détérioration des sols par la formation de pellicule noir (photo 3). Cette hypothèse a été confirmée par Legall *et al.* (2013) qui expliquent la dégradation de la qualité du sol à Kossodo par la culture d'épinard en continu, sans variation culturale et associée à la mauvaise qualité des eaux usées traitées. Toutefois pour pallier le problème de dégradation des sols, les producteurs de ce site ont quelques fois recours à l'intensification de la fertilisation organique, qui semble être sans effet significatif sur l'amélioration de la qualité des sols. Du fait de la proximité de l'abattoir frigorifique de Ouagadougou, le fumier (surtout celui des bovins) est la fertilisation organique la plus utilisée par rapport aux déchets urbains solides et de tout autre amendement organique. Aussi, les producteurs de ce site ont quelques fois recours à la fertilisation minérale (urée) à de faible dose. Les maraîchers de ce site sont organisés en association constituée pour la grande majorité de femmes et peu d'hommes.

Le site de Wayalghin a connu plus de variation culturale que celui de Kossodo, mais cette variation est restée faible par rapport à celle de Boulmiougou. Il semble être le plus ancien des trois sites avec des producteurs qui se sont installés depuis plus de quarante-quatre (44) ans. Les producteurs avec une composition variable d'hommes et de femmes utilisent les eaux usées qu'ils jugent de bonne qualité. Comparativement au site de Kossodo, les maraîchers de Wayalghin utilisent une diversité de fumure organique notamment le fumier de bovin, de ruminant, de cheval, associée quelques fois avec des copeaux de bois. La fertilisation minérale rencontrée est surtout l'urée à de faibles doses.

Quant au site de Boulmiougou, les résultats de l'enquête ont montré une très grande diversité de cultures réparties sur des superficies variées selon la taille des parcelles. Nos résultats confirment ceux de Zongo (2009) qui a montré une multitude de spéculation sur ce site. L'ancienneté du site ainsi que l'organisation des producteurs en groupement est un atout favorable à la production des cultures et à la bonne maîtrise des systèmes de gestion de la fertilité. La particularité de ce site est bien qu'étant homogène, il compte plus d'hommes que

de femmes. Les maraîchers du site de Boulmiougou utilisent exclusivement l'eau du barrage et / ou des puits environnant pour leur système d'irrigation. Les fertilisants utilisés sur ce site sont la plupart des engrais chimiques (urée) parfois à forte dose. La fumure organique est de toute provenance et de tout type (fumier de bétail et de petit ruminant, de fumier de porc, des fientes de volaille, déchets urbains solides) du fait de l'éloignement du site par rapport aux sources de substrats.

3.2.2. Caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation des sites étudiés

Les résultats des analyses ont montré que la charge d'azote minérale est fortement dominée par les nitrates par rapport à l'ammonium. Ces résultats sont conformes à ceux d'Akouze (2010) et contredisent ceux de Passy (2007) qui a observé une dominance de l'azote ammoniacal par rapport aux nitrates. La forte présence de nitrates contenue dans les eaux de Kossodo pourrait s'expliquer par le fait que les nitrates ne subissent aucun traitement et que leur rendement épuratoire est parfois négatif. Par contre le système de traitement par lagunage élimine les quantités d'azote ammoniacal (Koné, 2002). En effet, le taux d'abattement peut aller au-delà de 54 % (Passy, 2007). Cela explique l'existence de fortes teneurs de N-NH_4^+ dans les eaux usées non traitées comparativement aux eaux usées traitées, puisque le système de traitement réduit ces formes d'azote. L'une des hypothèses du faible taux de N-NH_4^+ dans les eaux de Kossodo pourrait être aussi expliquée par le phénomène de nitrification qui élimine l'ammonium en la transformant en nitrates.

Les fortes valeurs de pH, de Na^+ et d'Ec des eaux de Kossodo pourraient être expliquées par les caractéristiques des eaux à l'entrée de la station. Il est important de signaler que la station d'épuration traite des eaux usées urbaines constituées d'un mélange d'eaux usées domestiques et d'eaux usées industrielles. Ainsi, diverses industries polluantes déversent leurs effluents dans le réseau d'assainissement. En comparant les teneurs en élément chimique de certaines unités industrielles (Brasserie, abattoir) et les teneurs des eaux de la station, Passy (2007) établit la corrélation entre ces fortes valeurs. Aussi les bouteilles servant au conditionnement de la bière de la brasserie Brakina sont lavées avec de la soude (NaOH) et la désinfection des équipements se fait avec de l'eau additionnée d'adjuvants comme le phosphate trisodique (Passy, 2007). Cela justifierait l'augmentation du pH et l'accroissement de la conductivité électrique et de la teneur en sodium. L'hypothèse d'une forte pollution des eaux des stations d'épuration par les industries a été également confirmée par Belaid (2010).

Il est important de mentionner que les normes nationales de déversement des eaux usées dans les eaux de surface ne sont pas respectées car les teneurs en Na^+ et en Ec présent dans les eaux de Kossodo sont supérieures à celles recommandées. Egalement, le pH et l'Ec des eaux environnent la limite au-delà de laquelle l'eau d'irrigation devient impropre aux cultures ($\text{Ec}=3000 \mu\text{S.cm}^{-1}$; $\text{pH}=10,5$). L'explication la plus vraisemblable de la faible diminution du pH des eaux usées non traitées de Wayalghin par rapport à Kossodo peut être due au fait que les eaux de wayalghin sont d'origine domestique et même celles industrielles provenant en petite partie de l'hôpital et de la société de manufacture du cuir TAN ALIZ se jettent dans le cours d'eau. Ces eaux sont mélangées avant d'être utilisées par les maraîchers.

3.2.3. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur la fertilité chimiques des sols

Parmi les trois sites, le taux le plus élevé de MO a été enregistré sur le site de Wayalghin suivi de Boulmiougou et enfin à Kossodo. Cet état de fait est dû à la forte variation du type de fumier (fumier de bovin, de ruminant, de porc, fientes de volailles, etc.) utilisé par ces deux sites par rapport au site de Kossodo qui utilise plus le fumier de bovin. Cela confirme une de nos hypothèses à savoir que la diversification de la fertilisation organique crée une augmentation de la fertilité chimiques des sols par l'augmentation du taux de MO. Outre la fertilisation, la variation des cultures sur les sites de Boulmiougou et Wayalghin a aussi expliqué ces résultats. En effet, ces sites ont connu plus de rotation et de diversification culturelle que celui de Kossodo. Enfin la qualité d'eau d'irrigation et la situation géographique du site ont aussi influencé le taux de MO. Les EUNT que les producteurs jugent d'être de bonnes qualités, associées à la situation géographique en bas de versant a contribué à une augmentation du taux de la matière organique du sol. Cela a été confirmé par Kiba (2012) qui conclut que des sites situés en bas de versant et le long des canaux d'eaux pourraient être enrichis en de fins sédiments qui, certainement augmente le taux de MO.

Le faible taux de matière organique enregistré à Kossodo s'explique par une minéralisation rapide du carbone due à la forte activité biologique observée. Une partie du carbone est immobilisé par les microorganismes. Diarra (2008) et Sou (2009) ont également trouvé un rapport C/N des sols irrigués avec les EUT inférieur à celui des autres sols, ce qui confirme en partie nos résultats. Cette baisse de MO est sans doute due au faible rapport C/N qui peut être expliqué par une meilleure cinétique de décomposition de la Matière Organique. D'une manière générale des résultats similaires à nos résultats ont été observés par Diarra (2008),

avec un taux de MO (EUT: 0,79% ; ET: 1,09%) sur le site expérimental de Kossodo avec des parcelles irriguées par les eaux usées traitées et des parcelles irriguées avec l'eau de l'ONEA.

Les résultats ont montré que le pH des sols de Kossodo est fortement alcalin (pH 9,56) par rapport aux pH des sols de Wayalghin et de Boulmiougou. Les travaux de Sou (2009) et Diarra (2008) le pH alcalin des sols de Kossodo. Cette différence de pH d'un site à l'autre pourrait s'expliquer par la qualité de l'eau d'irrigation au moment de l'arrosage. L'on pourrait attribuer cette hausse de pH à d'autres facteurs tels que la fertilisation, la diversité culturale et l'ancienneté du site, mais cela ne pourrait refléter ces hautes valeurs de pH. L'hypothèse la plus plausible de cet état de fait est due à la qualité des eaux usées qui sont fortement alcalines : pH = 9,46. Ceci tend à confirmer les résultats de Kiemdé (2008) et de Sou (2009) qui ont trouvé qu'à la sortie de la station d'épuration le pH atteignait jusqu'à 11,45, valeur qui dépasse la norme Burkinabè de rejet des eaux usées dans la nature fixée entre 6,4-10.

Les sols de Wayalghin ont présenté un pH légèrement basique à l'opposé de ceux de Boulmiougou qui sont acides. La basicité de ces sols peut être liée à l'effet des eaux usées non traitées et à la fertilisation organique qui contribuent à une légère augmentation du pH des sols. En effet, les eaux usées contiennent des teneurs en bicarbonate de sodium ce qui confère aux sols le caractère alcalin (Sou, 2009).

L'acidité des sols de Boulmiougou ne peut pas être attribuée à la qualité des eaux d'irrigation du barrage puisqu'elles ne sont pas très acides (pH: 6,49). Cela peut être due aux apports important d'éléments minéraux surtout azotés qui acidifient le sol. L'effet de la fertilisation minérale à travers sa dose d'utilisation a eu un impact négatif sur le pH des sols. Cela s'explique par le fait que Boulmiougou reçoit de fortes doses d'urée par rapport aux deux autres sites (Zongo, 2009). L'ancienneté du site et l'intensité des activités sur un sol contribue à l'abaissement du pH de ce sol. Cela concorde avec nos résultats et a été confirmé par Ondo (2011) qui a montré qu'une période d'exploitation de plus de dix (10) ans influence négativement les propriétés physico-chimiques des sols par une acidification.

Les résultats des analyses ont montré que les sols de Wayalghin, Boulmiougou et Kossodo respectivement contenaient les forts taux d'azote. Ainsi, plusieurs facteurs ont influencé d'une manière ou d'une autre ces teneurs en azote. La fertilisation par l'apport de fertilisants surtout minéraux ont enrichi les teneurs en azote total des sols. Ce constat peut être observé entre les sols de Boulmiougou et de Kossodo. En effet, la fertilisation minérale a été très importante sur le site de Boulmiougou que sur le site de Wayalghin (fertilisation minérale

faible). Nos résultats confirment ceux trouvés par Zongo (2009) qui ont montré que le site de Boulmiougou a reçu plus de dose d'engrais (urée) pour les mêmes cultures que celui de Wayalghin. La faible fertilisation rencontrée sur le site de Wayalghin justifie le fait que les producteurs de ce site considèrent que les EUNT constituent une autre forme de fertilisation. Les sols de Kossodo dont les teneurs en azote total sont plus faibles que les autres sols pourraient être justifiés par la mauvaise pratique culturale exercée sur ce site. Il y a peu de diversités culturales (monoculture). Il faut noter également que la forte activité biologique rencontrée sur ce site a pu entraîner une immobilisation de l'azote par les microorganismes. Pour ce qui est de l'éventuel impact des eaux usées sur la fertilité des sols, notre étude a montré un apport important d'azote par les eaux usées en générale. Ce qui justifierait les forts teneurs en azote présentés dans les sols de Wayalghin. Cependant des conclusions différentes ont été observées sur les sols de Kossodo. En effet, ces sols ont présenté les plus faibles teneurs en azote total par rapport aux autres sols. Ce constat de faible taux d'azote dans les sols est probablement dû au système de traitement des eaux, car le traitement par lagunage à microphytes élimine une partie de l'azote des eaux. Ce taux variant de 25 à 30% et même jusqu'à 60% (Koné, 2002; Kiemdé, 2006).

L'étude a montré que d'une manière générale, les sols du site de Kossodo ont présenté les valeurs les plus élevées en phosphore et en potassium total par rapport à ceux de Wayalghin. Cet état de fait s'explique par le potentiel fertilisant des eaux usées et à la concentration de phosphore ($7,5 \text{ mg.l}^{-1}$) et de potassium ($30,50 \text{ mg.l}^{-1}$) présente dans les eaux usées traitées par rapport aux eaux usées non traitées. Egalement plusieurs auteurs (Ryan *et al.*, 2006 ; Thaw, 2006 ; Belaid, 2010) ont montré que l'irrigation avec les eaux usées traitées permettait d'augmenter significativement les éléments minéraux des sols. Les résultats de nos travaux contredisent ceux de Kiziloglu (2008) qui ont montré que les systèmes de maraîchage utilisant les eaux usées traitées comme source d'irrigation ont présenté de faibles valeurs par rapport à ceux utilisant les eaux usées non traitées.

Le niveau élevé de phosphore et de Potassium des sols à Boulmiougou par rapport à Wayalghin pourrait être expliqué par un important apport d'amendements combiné à la meilleure gestion de la fertilité des sols et à l'ancienneté du site. Cette hypothèse confirme les résultats trouvés par Kiba (2012) qui montrent que la présence d'organisations de producteurs pourrait permettre un accès facile aux financements et par conséquent faciliter l'acquisition d'engrais minéraux. Ce qui expliquerait les forts apports d'engrais minéraux sur ce site. En

fait, Boulmiougou reçoit plus de fertilisation surtout minérale que les autres sites parce que les maraîchers jugent que l'eau de barrage n'apporte aucun élément nutritif. D'une manière générale la variabilité des quantités apportées de fertilisants entre les sites a beaucoup influencé la variabilité des caractéristiques chimiques des sols.

Nos travaux ont permis de mettre en évidence un niveau élevé du taux de sodium contenu dans les sols de Kossodo par rapport à ceux de Wayalghin et Boulmiougou. En effet ces résultats confirment l'hypothèse d'une forte sodicité des sols sur le site de Kossodo. Ni la fertilisation, ni les pratiques culturales ne peuvent expliquer ces forts taux de sodium dans les sols de Kossodo. L'ancienneté du site pourrait en expliquer, mais la littérature a montré que le site de Kossodo est récent (depuis 2006) par rapport aux autres. Ce problème de sodisation est dû sans doute à la qualité des eaux d'irrigation. En effet, l'analyse de ces eaux a montré une forte concentration en sodium (356,09 mg /l), ce qui entrainerait une accumulation progressive de sodium dans les sols. Ces eaux à l'entrée et à la sortie de la STEP, sont caractérisées par un faciès bicarbonaté et sodique qui n'est que le mélange des eaux usées de différentes industries raccordées au réseau. Selon Passy (2007) les eaux usées de la Brasserie sont de la même famille que celle à l'entrée de la STEP et en constitue la grande partie. Toutefois cette augmentation du taux de sodium dans les eaux est sans doute liées aux activités et aux rejets de produits chimiques de la brasserie car les bouteilles servant au conditionnement de la bière sont lavées avec de la soude (NaOH) (Passy, 2007). Il y a en outre le mauvais fonctionnement de la station dû aux performances épuratoires faibles, souvent négatives pour les cations : 2,9 % pour le sodium; -2,8 % pour le calcium, 0,2 % magnésium et -1,5 % pour le potassium (Passy, 2007).

L'effet d'un excès du sodium cause sans doute des dommages aux sols et aux cultures. Vraisemblablement la présence d'une quantité excessive de sodium dans l'eau (par rapport à la concentration totale des sels dissous dans le sol) nuit aussi à l'infiltration de l'eau (FAO, 2003). Cela confirme nos observations sur le terrain et lors de la mesure de la Capacité Maximale de Rétention (CMR) qui montre une réelle difficulté à l'eau de pouvoir s'infiltrer (photo 5 en annexe 2).

Pour ce qui est toujours de l'influence des eaux d'irrigation sur la qualité chimique des sols, les résultats ont montré que la forte teneur en Ca^{2+} identifié sur les sols de Wayalghin a prouvé que les eaux usées non traitées contenaient d'énormes quantités de calcium. Ceci corrobore nos résultats des analyses des eaux, qui ont montré que parmi toutes les eaux

d'irrigation, seules celles de wayalghin possédaient de forte teneur en Ca^{2+} . L'hypothèse d'une élévation de calcium peut s'expliquer par la nature chimique des eaux. Selon Passy (2007), on détecte la présence de carbonate dans les eaux à partir d'un $\text{pH} > 8,3$ et la présence de bicarbonate à un $\text{pH} < 8,3$. L'existence d'un $\text{pH} = 6,97$ dans les eaux de Wayalghin conclut que ces eaux d'irrigation ont au moins un faciès bicarboné; hors la présence de bicarbonate dans les eaux entraîne sous l'effet de l'évaporation la formation de précipité de sel qui débute généralement par la calcite ou le carbonate de calcium (CaCO_3) dans les sols, et jusqu'à un stade avancé, la formation de carbonates ou bicarbonates de sodium (Na_2CO_3^- et NaHCO_3^-) (Al-Droubi *et al.* 1980). Ceci est expliqué par le taux élevé de Ca^{2+} à un stade non avancé à Wayalghin et un fort taux de Na^+ à Kossodo (stade avancé).

Aussi une des raisons du taux de Ca^{2+} des sols estimé à $20,68 \text{ Cmol}^+\text{Kg}^{-1}$ de sol peut être sans doute la résultante de l'alcalinité des sols $\text{pH}_{\text{eau}} = 7,88$. En effet, l'analyse a dévoilé une corrélation positive ($r = 0,78$) entre le calcium et le pH sur les sites de Wayalghin et Boulmiougou. L'ancienneté du site joue un rôle dans la concentration en Ca^{2+} et en Mg^{2+} . Les résultats d'Ondo (2011) ont montré que les concentrations en Ca et Mg échangeables sont plus élevées dans le sol cultivé depuis 5 ans que dans les sols cultivés depuis 10 ans, et cela est lié à la bonne pratique culturale. Ceci contraste nos résultats. Ainsi nos analyses ont montré que les concentrations en Ca et Mg échangeables étaient relativement faibles à Kossodo qu'à Wayalghin. Ce constat semble être lié à la mauvaise pratique culturale (monoculture) due au fait que les autres espèces végétales ne s'adaptent pas à ces sols irrigués avec l'eau usées traitées.

La forte teneur en K échangeable enregistrée sur le site de Kossodo est due au taux élevé de Na^+ . Cela est expliqué par Laurensen (2011) par une rétention préférentielle de K^+ par rapport au Na^+ lorsque le taux de Na^+ s'accroît dans les eaux d'irrigation. On note également une concentration plus élevée de K^+ à Boulmiougou qu'à Wayalghin

Le potassium échangeable est en effet aussi responsable de la dispersion des argiles, phénomènes rencontrés dans la plus-part des sols marâchers à forte teneur en K^+ ou en Na^+ (Laurensen, 2011). Toujours selon cet auteur, bien que l'accumulation de cations monovalents dans le sol soit indésirable, la dispersion des argiles dues au potassium échangeable est moins dommageable que celle en réponse de Na^+ . D'une manière générale une partie de nos résultats notamment les teneurs en Mg^+ et Ca^{2+} sont conformes à ceux de Kiziloglu (2008) qui a trouvé que les sols d'un système de marâchage proche de celui de Kossodo contenaient des teneurs en bases échangeables plus faibles que celui proche de

Wayalghin. Par contre, les teneurs en Na^+ et K^+ sont plus élevées pour les sols de Kossodo que ceux de Wayalghin qui contrastent avec ceux du même auteur.

Les sols de Wayalghin et de Kossodo ont contenu d'une manière générale un niveau plus élevé de CEC par rapport aux sols de Boulmiougou. Cela peut être attribué à l'utilisation de différentes qualités d'eaux d'irrigation, car les sols irrigués avec les eaux usées avaient un niveau élevé de la CEC comparés aux sols irrigués avec l'eau du barrage. Ces résultats diffèrent de ceux trouvés par Diarra (2008) et Kiziloglu (2008) qui ont estimé que l'irrigation avec les eaux usées traitées diminuait la CEC des sols par rapport à l'irrigation avec l'eau potable.

Selon Belaid (2010) le niveau élevé de la CEC peut être dû à un enrichissement du sol en matière organique et éventuellement en azote. Les travaux de Baize (1988) ont montré qu'un gramme de matière organique contribue à augmenter 4 à 5 fois à la CEC qu'un gramme d'argile. Ce constat confirme également nos résultats par le niveau élevé en MO et en azote sur le site de Wayalghin. Ainsi la MO et l'azote sont en corrélation positive avec la capacité d'échange cationique. Ces conclusions contredisent en partie cet état de fait car Boulmiougou possède des niveaux plus élevés de MO et d'azote par rapport à Kossodo avec cependant une faible CEC.

Cela est dû sans doute à la nature des sols notamment la texture qui est de type limono-argileux et de l'association des argiles avec les composés humiques plus faibles à Boulmiougou qu'à Kossodo.

De la relation entre la CEC et le taux de saturation il ressort que Wayalghin possède la plus grande CEC, qui est saturée à 162% par le calcium. Il en est de même pour le Ca^{2+} sur le site de Kossodo et de Boulmiougou qui sature respectivement à plus de 49 % et 69% la CEC. Cette relation montre que le calcium est le plus échangeable par rapport aux autres bases. Ainsi de forte teneur en calcium pourrait entraîner un effet bénéfique sur les propriétés physiques par une compensation de l'excès de sodium sur les propriétés physiques du sol (Lhadi *et al.*, 1993). En dehors du calcium, le Na^+ est parmi les autres bases échangeables celui qui sature le plus la CEC, sur le site de Kossodo ce qui traduit clairement le phénomène de sodisation des sols lié à l'utilisation prolongée des EUT.

Le faible taux de saturation de la CEC à Boulmiougou par rapport aux autres sites s'explique en partie par l'acidité du sol. Ceci confirme l'idée de Anonyma (2012) qui indiquait qu'à pH acide le complexe argilo-humique se sature entre 50 à 85% de la CEC. En effet le pH acide

influence la rétention de certains cation notamment le Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, NH_4^+ , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} au détriment des autres. Des faibles taux de saturation signifient que des ions positifs échangeables tels que H^+ , mais surtout $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ et Al^{3+} sont présents sur le complexe généralement en situation de sol acide (www.echangetv.levantin.free.fr).

Le concept de conductivité électrique des sols est un phénomène inhérent à la qualité des eaux et au mode d'irrigation. Il est plus accentué pour une irrigation de surface comparée à une irrigation en submersion. En effet, les enquêtes et les observations ont montré que sur les trois sites maraîchers étudiés l'irrigation est de surface de type aspersion. De ce fait, le seul paramètre qui a pu contribuer à une augmentation considérable du niveau de la conductivité électrique a demeuré la qualité des eaux. Au regard de nos résultats, nous pouvons conclure que l'irrigation des sols avec les eaux usées a entraîné un niveau élevé de la conductivité électrique des sols par rapport à l'irrigation à l'eau du barrage. Des résultats similaires ont été obtenus par Sou (2009) et Belaid (2010) qui ont montré que l'irrigation à long terme avec les eaux usées augmentait considérablement la conductivité électrique, donc la salinité des sols comparativement aux eaux non usées. Cet état de fait est sans doute lié aux forts teneurs en sel contenus dans les eaux usées. On remarque que dans les eaux de Kossodo, la conductivité électrique atteint parfois $2926 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ce qui a conduit à une accumulation progressive des sels suite à la forte évapotranspiration rencontrée dans nos sols. Les sols de Wayalghin quant à eux présentent une très légère salinité due à la meilleure qualité des eaux d'irrigation par rapport à celles de Kossodo.

Les résultats montre que le SAR est très fortement corrélé avec le PSE du sodium ($r = 0.99$). Ce constat a été confirmé par (Cucci *et al.*, 2011) qui ont montré que la concentration en sodium échangeable a augmenté avec la concentration de sel et de SAR.

Le taux élevé de SAR rencontré sur les sols Kossodo est dû à la forte concentration de sodium contenue dans les eaux (356,5 mg/l). En effet, les eaux usées traités ont un SAR (44,57) largement supérieur aux normes de qualité des eaux d'irrigation, ce qui stipule que lorsque le SAR des eaux est supérieures à 24, ces eaux causent des problèmes de dégradation des sols et sont situés dans la catégorie des eaux présentant des problèmes graves (FAO, 2003).

Au vu des résultats sur le SAR, le PSE et le pH, nous pouvons classer ces sols comme étant des sols légèrement alcalins et sodiques puisque nos résultats corroborent les normes de classification des sols établit par l'USDA (United State Department of Agriculture) qui considère comme sol à la fois salé et sodique des sols dont le sodium occupe plus de 50 % de

la CEC, un pH pouvant atteindre 10 et présentant une structure plus ou moins dégradée. Nos travaux ont également révélé le caractère sodique des sols de Kossodo par le taux élevé de sodium échangeable (54,6%). Ces conclusions sont conformes à ceux de Compaoré (1998) qui montrent que lorsque le taux de sodium échangeable est élevé (supérieur à 15 %), ses sols sont considérés comme sodiques.

A Wayalghin comme à Boulmiougou le SAR et le PSE sont relativement faibles mais restent cependant fortement corrélés ($r = 0,97$ pour le site de Wayalghin et $r = 0,90$ pour le site de Boulmiougou) entre eux au seuil de 5 %. Des résultats similaires ont été trouvés par Assouline *et al.*, (2011) avec un SAR eaux usées traitées (2,59) et SAR eau potable (0,94). Cet état de fait est lié en partie à la faible concentration de sodium échangeable présente sur les sites irrigués avec les eaux conventionnelles.

3.2.4. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur l'activité biologique des sols

L'allure des courbes de respiration des sites maraîchers montre qu'en général (sauf pour celui de Kossodo les deux premiers jours) dès les premiers jours d'incubation et ce jusqu'au 5^{ème} jour une baisse progressive des quantités de CO₂ dégagés correspond à une diminution de composés facilement biodégradables. La phase de reprise de la respiration correspond à une légère reprise de l'activité par la dégradation des composés plus résistants à la dégradation de produits néoformés. La dernière phase caractérisée par une diminution des quantités journalières de CO₂, est liée à une faible activité des microorganismes restants et à l'épuisement de plus en plus poussé des nutriments facilement biodégradables. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Zongo (2009).

L'activité biologique est un bon indicateur de la fertilité d'un sol, puisqu'elle permet de suivre la dynamique des processus de décomposition et de transformation de la matière organique. Selon Lompo (2007) et Coulibaly (2008) les différences de respiration constatée entre deux traitements semblent être liées au taux de matière organique. Ils confirment que le taux de matière organique le plus élevé aurait le plus augmenté l'activité respiratoire du sol. D'une manière générale, nos résultats sont différents de ceux trouvés par ces auteurs. Nos travaux ont montré que l'activité respiratoire la plus intense a une corrélation négative ($r = -0,29$) avec le taux de matière organique. Cela a été confirmé par Razafintsalama *et al.*, (2014) qui montrent que sur quatre (04) années consécutives d'irrigation, les teneurs en matière organique ont diminué la quatrième année suite à une stimulation de l'activité biologique, ce qui a favorisé la minéralisation des matières organiques. Cependant en

comparant site par site, nous trouvons que c'est entre Wayalghin et Boulmiougou que nos résultats confirment ceux cités plus haut. L'explication plausible du fort dégagement de CO₂ à Kossodo pourrait être due à la forte fertilisation organique (fumier) et aux caractéristiques du carbone. Le fumier utilisé contient des composés organiques qui lorsque les conditions sont favorables entraînent une minéralisation rapide des composés facilement biodégradables. Ce qui a été le cas sur le site de Kossodo qui a connu une bonne minéralisation (C/N= 10,33), et a une meilleure disponibilité du carbone pour les microorganismes. Aussi le taux de calcium rencontré ($Ca^{2+} = 6,18 \text{ Cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol) sur ce site confirme ce fort dégagement car selon Sedogo (1977), le calcium joue un rôle important dans les processus d'humification et de minéralisation.

A Wayalghin, le niveau satisfaisant de l'activité microbienne présume d'une meilleure activité respiratoire. En effet, l'activité microbienne est fortement corrélée avec le taux de carbone total disponible dans le sol ($r \approx 0,78$) et certainement à la proportion des composés facilement minéralisables. Le taux élevé d'azote du sol rencontré sur ce site a également amélioré l'activité des microorganismes. Cette hypothèse a été confirmée par Salawu (2009) qui souligne que l'azote favorise l'activité des bactéries responsables de l'ammonification et de la nitrification, ce qui favorise la mise à disposition rapide des produits transformés et leur meilleure assimilation par la plante. Les travaux de Thiombiano *et al.* (1999) ont également révélé une corrélation significative et positive entre la respiration du sol, l'azote et la matière organique, dans des états de surface des sols sahéliens.

La faible respiration rencontrée à Boulmiougou pourrait s'expliquer par le pH acide (5,53) des sols. En effet, le pH acide des sols entraîne une prédominance des champignons et une inhibition de l'activité microbiologique (ITAB, 2002).

3.2.5. Impacts de trois systèmes de maraîchage sur la biomasse microbienne et le quotient respiratoire des sols des sites maraîchers étudiés

D'une manière générale les résultats ont montré que les sols de Kossodo et de Wayalghin ont présenté les faibles teneurs en biomasse microbienne. Ceci étant lié à plusieurs facteurs parmi lesquels il y a l'irrigation qui joue un rôle important dans les quantités de biomasse microbienne. En effet, les systèmes de maraîchage qui ont utilisé les eaux usées comme source d'irrigation ont entraîné une diminution de la biomasse microbienne des sols. Cela confirme en partie les travaux de XU De-lan1 (2012) qui ont montré que les eaux usées d'irrigations réduisaient respectivement les quantités des groupes de bactéries (actinomycètes,

bactéries nitrifiantes et les bactéries dénitrifiantes). Ainsi, les plus faibles valeurs de biomasse microbienne observées à Kossodo sont dues en grande partie aux extrêmes teneurs de sodium, de pH et conductivité électrique contenu dans les sols. Cela pourrait être aussi associé au phénomène de dispersion des argiles dû à la forte concentration de sodium accumulé dans le sol qui réduirait la microporosité et entraînerait une diminution de la biomasse microbienne.

La hausse de la biomasse sur le site de Boulmiougou peut être attribuée à la typologie des microorganismes car à pH acide les champignons prédominent (ITAB, 2002). Cette augmentation de la biomasse microbienne à Boulmiougou par rapport à celle de Kossodo peut être également attribuée aux teneurs élevées de matière organique présente dans le sol. Des études similaires (Lompo, 2007; Coulibaly, 2008; Zongo, 2009) ont trouvé que la biomasse microbienne croît avec l'augmentation de la teneur en matière organique du sol.

La forte variation de la biomasse microbienne d'un site à l'autre est sans doute liée au type de culture pratiqué et la rotation culturale. En effet selon l'ITAB (2002) la biomasse microbienne varie fortement au cours de la rotation culturale en agriculture. Cette idée confirme nos résultats qui montrent que la biomasse microbienne est fortement corrélée avec la rotation culturale. Effectivement Boulmiougou qui présente une multitude de spéculations et une rotation culturale diversifiée, a une biomasse microbienne supérieure à celle de Wayalghin, qui à son tour est plus élevée que celle de Kossodo.

Le quotient respiratoire de l'ensemble de ces sols est par contre corrélé positivement avec la respiration des microorganismes. Plus l'activité respiratoire est intense, plus le quotient respiratoire est important. De cet fait, les résultats de nos travaux ont montré que le quotient respiratoire a varié dans le sens de Kossodo >Wayalghin > Boulmiougou.

L'augmentation du quotient respiratoire des sols de Kossodo montre une meilleure utilisation de la matière organique par les microorganismes des sols qui se manifeste par un faible taux de MO résiduel. En effet, le fort taux de minéralisation a permis une mise à la disposition de la matière organique facilement biodégradable qui aurait entraîné une stimulation de la respiration.

CONCLUSION

L'étude a été réalisée en comparant les propriétés chimiques et biologiques des sols de trois systèmes de maraîchage dans la ville de Ouagadougou.

Il ressort de cette étude que la variabilité des systèmes de maraîchage a eu un impact plus ou moins différent sur la qualité chimique et biologique des sols. Plusieurs facteurs constituaient ces systèmes de maraîchage. Il s'est agi des pratiques de fertilisation, de la proximité des sites par rapport aux sources de fertilisants, de la présence d'organisations de producteurs ainsi que de leur technicité. D'autres facteurs tels que l'ancienneté du site, la localisation, la variation culturale et surtout la qualité des eaux ont aussi contribué à la diversification de la fertilité chimique et biologique des sols.

La caractérisation des trois sites maraîchers a permis de mettre en évidence une large gamme de pratique culturale variable à l'intérieur et entre les sites. Cela a permis de conclure que le site de Kossodo est fortement caractérisé par une monoculture par rapport aux deux autres sites dont les pratiques culturales sont diversifiées. Quant à la fertilisation organique, l'étude a révélé qu'elle est plus accentuée à Kossodo qu'à Boulmiougou qui met plus l'accent sur la fertilisation minérale.

L'analyse chimique des différentes qualités d'eaux d'irrigation a permis de mettre en évidence les teneurs en (N, P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) des eaux usées, qu'elles soient traitées ou non. Il ressort que les eaux de Kossodo contiennent plus de teneur en éléments nutritifs que celle de Wayalghin excepté le cas du Ca^{2+} et du Mg^{2+} . Et comparativement aux eaux du barrage, les eaux usées qu'elles soient traitées ou non ont eu les teneurs les plus élevées en éléments chimique. En outre, il convient de noter que le pH, les teneurs en Na^+ et la conductivité électrique des eaux d'irrigation de la STEP de Kossodo dépassent largement les normes de réutilisation des eaux usées en agriculture prévues par la FAO, l'OMS et le Burkina Faso.

D'une manière générale, les systèmes de maraîchage ont eu des impacts plus ou moins différents sur les caractéristiques chimiques des sols. Ainsi, l'étude a montré que les sols de Wayalghin ne contenaient pas véritablement de forte concentration en éléments chimiques, sauf le cas du calcium qui semble se retrouver en excès. Par conséquent, selon les normes établies par l'Office de la Recherche des Sciences et Techniques Outre-Mer (ORSTOM), les sols de Wayalghin peuvent être classés dans la gamme des sols alcalins.

A Kossodo, les résultats ont montré que leur système de maraîchage a fortement contribué à la détérioration de la qualité des sols. Mais au regard des résultats, nous arrivons à la conclusion que cela est principalement dû à la mauvaise qualité des eaux d'irrigation qui contraint les maraîchers à pratiquer une monoculture puisque l'agriculture est de type restrictif et que seules quelques espèces végétales s'adaptent à ces sols. Cet état de fait peut-être confirmé par les fortes teneurs en éléments chimiques des sols : Na^+ ($4,39 \text{ Cmol}^+\text{Kg}^{-1}$ de sol) ; Ec ($1247 \mu\text{S.cm}^{-1}$) et de pH (9,56) qui dépassent les normes de qualité des sols pour un usage agricole. C'est ainsi qu'au regard de ces teneurs et selon les normes établies par l'ORSTOM pour la classification des sols, nous pouvons classer ces sols dans la gamme des sols sodiques, alcalins et salins.

Ce travail a permis de montrer que le système de maraîchage utilisant les eaux usées a augmenté l'activité microbienne et la respiration spécifique des sols par rapport à celui de utilisant les eaux de barrage qui a exprimé le plus faible dégagement de CO_2 . Quant à la biomasse microbienne, nos résultats ont indiqué que le système de maraîchage utilisant les eaux du barrage a entraîné une augmentation comparativement aux autres.

L'analyse chimique des différentes qualités d'eaux d'irrigation a permis de conclure que les eaux usées non traitées de Wayalghin dans notre contexte pourraient être mieux appropriées pour une réutilisation en agriculture restrictive si toutefois des mesures idoines sont prises pour parer au problème de pollution des cultures et de risque sanitaire.

En ce qui concerne les eaux d'irrigation de Kossodo, il est impératif de signaler que ces eaux sont entièrement inappropriées pour un usage agricole, même en agriculture restrictive.

RECOMMANDATIONS

De l'analyse de l'étude menée sur l'impact des systèmes de maraîchage sur la fertilité chimique et biologique des sols, nous arrivons à la conclusion que le système de maraîchage utilisant les eaux usées traitées comme source d'irrigation a détérioré la qualité des sols. Ceci étant dû à la mauvaise qualité des eaux, liée elle aussi aux fortes pollutions des unités industrielles raccordées au système de traitement dont les normes de rejets dans les égouts sont supérieures aux normes en vigueur au Burkina Faso. Ainsi, pour une meilleure réutilisation des eaux usées traitées en agriculture urbaine :

- Il nous sera primordial de faire des analyses afin de caractériser l'effluent à l'entrée et à la sortie de la station de traitement et de faire un état des lieux des performances épuratoires de la STEP destiné à un usage agricole.

- Aussi, la caractérisation des eaux usées de différentes industries raccordées au système et un suivi concomitant et rapproché des effluents industriels permettra la vérification stricte du respect des normes d'admission des effluents dans le réseau d'égouts.

Pour les industries qui ne respectent cependant pas les normes Burkinabè de rejet des effluents, la responsabilité incombe aux acteurs politiques et aux autorités compétentes de veillez au respect strict des normes. Il s'agira pour eux de :

- Veiller à ce que chaque unité industrielle soit équipée d'un système de prétraitement chimique et biologique de ses eaux usées;

- Réhabiliter les stations de traitement de certaines industries encore en mauvais fonctionnement;

- Créer une police environnementale chargée du contrôle qualité des effluents et de l'application des sanctions envers des industries qui ne respectent pas les normes de rejets, au Burkina Faso;

- Appliquer le principe pollueur-payeur : selon lequel les coûts liés à la dégradation de l'environnement doivent être assumés par celui qui en est responsable.

Enfin un suivi scientifique devra permettre un contrôle régulier et l'obtention des performances épuratoires toujours meilleures. A cet effet, un exemple de partenariat pourrait être conclu entre l'ONEA (exploitant) et le groupe 2iE qui est une référence en matière d'assainissement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Afnor. 1981. Détermination du pH. (association française de normalisation) NF ISO 103 90.
In : AFNOR : Qualité des sols, Paris, 339-348.

Akouze R., 2010. Activités anthropiques industrielles et qualité des eaux dans un bassin versant : cas du bassin versant de Kossodo. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Ingénierie en Eau et environnement : option Environnement. 2ie-Burkina, 98 p.

Al-Droubi A; Fritz, B; Gac, J.Y et Tardy Y., 1980. Generalized residual alkalinity concept; application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. American Journal of Science, 280: 560-572.

Anonyma., 2012. Le point sur la fertilité des sols en production fruitière. CTIFL N° 33 octobre 2012, 10 p.

Assouline S et Narkis K., 2011. Effets de l'irrigation à long terme avec des eaux usées traitées sur les propriétés hydrauliques d'un sol argileux. Water Resources Research, volume 47 Numéro 8 Août 2011, 97 p.

Baize D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologies. Edition INRA. Paris, 172 p.

Baumont S; Camard J-P; Lefranc A; Franconi A., 2004. Réutilisation des eaux usées: risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS, 220 p.

Belaid., 2010. Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax: salinisation, accumulation et phytoabsorption des éléments métalliques. Thèse de Doctorat, de l'Université de Sfax, 236 p.

Bunasols., 1998. Etude morpho-pédologique de la province du Kadiogo. Echelle *IISO* 1/50 000è. Rapport technique (III), 72 p.

Chaussod R; Zuvia M; Breuil M-C. et Hetier J-M., 1992. Biomasse microbienne et « statut organique » des sols tropicaux : exemple d'un sol vénézuélien des Llanos sous différents systèmes de culture. Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVII, no 1. pp 59-67

Chiou, R.J., 2008. Risk assessment and loading capacity of reclaimed wastewater to be reused for agricultural irrigation. Environmental Monitoring and Assessment, 142 (1-3): 255-

Cisneros J B; Pay D; Doulaye K; Akica B; Liqa R-S et Qadir M., 2011. Utilisation des eaux usées, des boues et des excréta dans les pays en développement. In : L'irrigation avec les eaux usées et la santé. Evaluer et atténuer les risques dans les pays à faibles revenu. Presses universitaires de l'université du Québec IDRC/CRDI, 440 p.

Cissé G; Kientga M; Ouédraogo B; Tanner M., 2002. Développement du maraîchage autour des eaux de barrage à Ouagadougou : quels sont les risques sanitaires à prendre en compte ? Cahiers Agricultures 2002, 11 : 31-38 p.

Cissé G., 1997. Impact sanitaire de l'utilisation d'eaux polluées en agriculture urbaine. Cas du maraîchage à Ouagadougou (Burkina Faso). Thèse, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 446 pp.

Compaoré M L., 1998. Cour de drainage et d'assainissement agricole. Ecole Inter états d'Ingénieurs de l'Equipement Rural, 240 p.

Conchita G.K; Sedogo M.P et Cissé G., 2010. Dynamique spatio temporelle de l'agriculture urbaine à Ouagadougou : cas du maraîchage comme une activité montante de stratégie de survie. Revue Vertigo, Volume 10 numéro 2, septembre 2010, 21 p.

Conchita G.K., 2010. Modélisation géomatique par évaluation multicritère pour la prospection des sites d'agriculture urbaine à Ouagadougou. Revue vertigo, volume 10 numéro 2, septembre 2010, 20 p.

Conchita G.K; Mevo G., 2011. SIG et analyse multicritère pour l'aide à la décision en agriculture urbaine dans les pays en développement, cas de Ouagadougou au Burkina Faso. Thèse de doctorat : Université paris8/Université Polytechnique de bobo Dioulasso, 301 p.

Coulibaly K., 2008. Effet des modes de gestion de la fumure et de l'utilisation des pesticides sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol et la pollution des eaux de ruissellement. Mémoire de DEA, option Sciences du sol. Institut du Développement Rural (IDR) / Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB). 59 p.

CTA / ETC-RUAF / CREPA., 2002. Visite d'étude et atelier international sur la réutilisation

des eaux usées en agriculture urbaine : un défi pour les municipalités en Afrique de l'ouest et du centre, 186 p.

Cucci G; G. Lacolla and P. Rubino., 2011. Irrigation with saline-sodic water: Effects on soil chemical-physical properties. *African Journal of Agricultural Research* Vol. 8(4), pp. 358-365, 6 February, 2013, 6 p.

Da Fonseca A F; Herpin U; De Paula A M; Victoria R L et Melfi, A., 2007. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)* vol.64 no.2 Piracicaba 2007, 64 (2): 194-209.

Denaix L., 2003. Exposition aux éléments traces métalliques et accumulation dans les végétaux consommés » in *Devenir et effets des contaminants métalliques dans les agro systèmes et écosystèmes terrestres*, Lille, INRA, pp20-21.

Diarra J., 2008. Impact des eaux épurées de la station d'épuration de l'ONEA sur la qualité physico-chimique et bactériologiques de la zone de maraîchage. Rapport de stage, licence professionnelle Sols Déchets et Aménagement du territoire : Université de Ouagadougou, 59 p.

Djeddi H., 2007. Utilisation des eaux d'une station pour l'irrigation des essences forestières urbaines. Mémoire de Magistère en Ecologie et Environnement Option : Ecologie végétale. Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Département des Sciences de la Nature et de la Vie, 157 p.

Dommergues Y., 1960. La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. Un exemple d'utilisation des techniques biologiques dans la caractérisation des types pédologiques. *Agron. Trop*, 15 (1) : 55-60.

El Rhazi O et Rachid H., 2007. Impact sanitaire de la réutilisation des eaux usées. Project de Fin d'études de Licence-SV. Université Cadi Ayyad : Faculté des sciences semlalia-Marrakech.

Faby J.A et Brissaud F., 1997. L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office International de l'Eau, 1997, 76 p.

FAO., 1999. agriculture urbaine et périurbaine. Comité de l'agriculture. <http://ftp.fao.org/unfao/bodies/COAG/COAG15/x0076f.htm>.

FAO., 2003. Irrigation avec les eaux usées traitées. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Bureau Régional pour le Proche Orient et Bureau sous-régional pour l'Afrique du Nord, 73 p.

FAO., 2007. Agriculture et rareté de l'eau: une approche programmatique pour l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la productivité agricole. COAG/2007/7, Rome, 15 p.

Fardoux J., Fernandes P., Niane-Badiane A., Chotte J.L., 2000. Effet du séchage d'échantillons d'un sol ferrugineux tropical sur la détermination de la biomasse microbienne- Comparaison de deux méthodes biocidales de référence. Etude et gestion des sols, 7, 4, 2000- Numéro spécial- 385-394.

Heidarpour M; Mostafazadeh-Fard B; Abeidi K.J; Malekian, R., 2007. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface irrigation methods. Agr. Water Management 90:87-94.

Hosetti B.B. et Frost S., 1995. A review of the sustainable value of effluents and sludges from wastewater stabilization ponds. Ecological Engineering, 5 (4): 421-431.

Hounto Y., 2000. Valorisation agricole des sous-produits de la station de lagunage à macrophytes flottant de l'EIER. Rapport biennal, 48 p.

http://echangetv.levantin.free.fr/Cours/Agronomie/cours_agro/E.Chapitre_3_Chimie_du_sol.pdf

Huibers F; Redwood M et Liqa R-S., 2011. Discuter les approches conventionnelles de gestion de l'utilisation des eaux usées en agriculture. In : L'irrigation avec es eaux usées et la santé. Evaluer et atténuer les risques dans les pays à faibles revenu. Presses de l'université du Québec IDRC/CRDI, 440 p.

IAGU/RUAF., 2007. Etude de cas sur le financement des agriculteurs et agricultrices de Ouagadougou (Burkina Faso) ; Rapport d'étude, CRDI, 81 p.

INSAH., 2004. Rapport annuel du Pôle GRN/SP 2000. Synthèse des activités des programmes thématiques régionaux. 83 p

ITAB., 2002. Activités biologiques et fertilité des sols : Intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles, 25 p.

Jenkinson D.S. and Powlson D.S., 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 8. P 208-213.

Jutras G., 2009. Cours « Fertilisation des sols en agriculture bio » / Cégep de Victoriaville. Guide pour l'interprétation d'une analyse de sol, 6 p.

Kaboré/Dembélé B., 2006. Contribution à l'étude des impacts socio-économiques, sanitaires et environnementaux de la réutilisation des sous-produits d'une station d'épuration des eaux usées : Cas de Kossodo dans la ville de Ouagadougou. Mémoire DESS Sciences Environnementales : Université de Ouagadougou, 85 p.

Kiba D. I., 2012. Diversité des modes de gestion de la fertilité des sols et leurs effets sur la qualité des sols et la production des cultures en zones urbaine, périurbaine et rurale au Burkina Faso. Thèse de doctorat. UPB, 142 p.

Kiemdé W H O., 2006. Epuration des eaux usées par lagunage à grande échelle sous climat sahélien : bilan de la station de lagunage de la ville de Ouagadougou à Kossodo après un an de fonctionnement et perspectives d'avenir. Mémoire d'ingénieur, fondation 2ie, Ouagadougou, Burkina Faso, 243 p.

Kiziloglu F.M; Turan M; Sahin U; Kuslu Y; 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. *Agricultural Water Management*, 95 (6): 716-724.

Koné D., 2002. Epuration des eaux par lagunage à microphytes et à macrophytes en Afrique de l'ouest et du centre : état des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement, Thèse n°2653 à l'Ecole polytechnique de Lausanne, 194 p

Lamizana/Diallo M. Birguy., 2008. Evaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un

cours d'eau temporaire du Burkina Faso : Le cas du Massili dans le Kadiogo. Université de Ouagadougou. Sud Sciences et technologies, volume N° 16 juin 2008, 6 p.

Larson Z M., 2010. Long-term treated wastewater irrigation effects on hydraulic conductivity and soil quality at penn state's living filter. Thesis in Soil Science, Department of Crop and Soil Sciences, 135 p.

Laurenson S., 2011. Soil structural changes following irrigation with a potassium rich winery wastewater. Centre for Environmental Risk Assessment and Remediation, University of South Australia, 10 p.

Legall L et Brondeau F., 2013. Les sites maraîchers planifiés en milieu urbain: quelle sécurisation foncière pour quelle sécurisation économique? Analyse à l'échelle locale. Le cas du périmètre maraîcher de Kossodo. Ouagadougou, Burkina Faso. Halshs-00862475, version-19sep 2013.

Lhadi E.K; Damnati-Adib N; Guessir H; Handoufe A. et Benchokroun T., 1993. Réutilisation des eaux usées en agriculture : Impact sur le sol et la nappe dans la région de Sid Bennour. 15 p.

Lompo D. J. P., 2007. Impacts des résidus de pesticides sur les microorganismes des sols dans les agro systèmes cotonniers du Burkina Faso. Mémoire de DEA, option Sciences du sol. Institut du Développement Rural (IDR) / Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB). 46 p.

Manios T; Papagrigoriou I; Daskalakis G; Sabathianakis I; Terzakis S; Maniadakis K; and Markakis G., 2006. Evaluation of primary and secondary treated and disinfected wastewater irrigation of tomato and cucumber plants under greenhouse conditions, regarding growth and safety considerations. Water Environment Research, 78 (8): 797-804.

Minhas P.S et Samra J.S., 2004. Wastewater use in peri-urban agricultural: impacts and opportunities, Karmal, Central Soil Sanility Research Institute, 75 p.

Mitchell J.P; Shennan C; Singer M.J; Peters D.W; Miller R.O; Prichard T; Grattan S.R; Rhoades J.D; May D.M and Munk D.S., 2000. Impact of gypsum and winter cover crops on soil physical properties and crop productivity when irrigated with saline water.

Agricultural Water Management, 45: 55-71.

Moustier P et Fall A-S., 2004. Les dynamiques de l'agriculture urbaine : caractérisation et évaluation. In: Olanrewaju B. S., Moustier P, Mougeot L. J.A., Fall A., 2004. Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone : Enjeux, concepts, méthodes. Canada : CIRAD/CRDI, 176 p.

Ondo J Aubin., 2011. Vulnérabilité des sols maraîchers du Gabon (région de Libreville) : acidification et mobilité des éléments métalliques. Thèse de doctorat, Spécialité Sciences de l'Environnement Terrestre. Université de Provence, 324 p.

Olanrewaju S.B; Moustier P; Mougeot I J A. et Fall A-S., 2004. Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone : Enjeux, concepts et méthodes. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement / Centre de recherches pour le développement international, CIRAD/CRDI, 176 p.

Ouédraogo B., 2002. Perceptions of Ouagadougou Market Gardeners on Water, Hygiene and Disease, Urban Agriculture Magazine, Number 8 p.

Passy F.J.D., 2007. Caractérisation chimique et bactérienne des eaux usées brutes de la station de Kossodo. Mémoire d'ingénieur, fondation 2ie, Ouagadougou, Burkina Faso, 138 p.

Qadir M et Scott C.A., 2011. Contraintes non pathogènes liées à l'irrigation avec des eaux usées. In : L'irrigation avec es eaux usées et la santé. Evaluer et atténuer les risques dans les pays à faibles revenu. Presses de l'université du Québec IDRC/CRDI, 440 p.

Razafintsalama M et Rakotondraibe J., 2014. Influences des rejets des eaux usées domestiques dans les cressonnières d'Andravoahangy (Madagascar). Evaluation de la capacité maximale d'adsorption des ions Cu^{2+} , Zn^{2+} et Fe^{2+} par les sols. Afrique Science 10(1) (2014) 79 – 90. 12 p.

Rodier J., Bazin C, Broutin J P, Chambon P, Champsam H, Rodil L., 1996. L'analyse de l'eau : eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. Dunod, Paris, 1996. 8^{ème} Edition 1384 p

Roberta A; Gloaguen T.V; Folegatti M.V; Libardi P.L; Lucas Y; Montes C.R., 2010. Distribution de la taille des pores dans les sols irrigués avec de l'eau et des eaux usées

sodique. Revue Bras. Science. Vol.34 n ° 3 Solo Viçosa mai / Juin 2010.

Ryan J.S.M et Qadir M., 2006. Nutrient Monitoring of Sewage Water Irrigation: Impacts for Soil Quality and Crop Nutrition. Communications in Soil Science and Plant Analysis. On: 28 June 2008, 10 p.

Salawu A., 2009. Influence des modes de gestion de la fertilité des sols sur l'activité microbienne dans un système de culture de longue durée au Burkina Faso. Thèse de doctorat. UPB, 215 p.

Sawadogo H., 2008. Approche GIRE et expansion de l'agriculture urbaine à Ouagadougou. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'équipement rural : 2ie-Burkina, 111 p.

Sedogo P. M., 1977. Etude de l'influence des boues résiduaires sur les propriétés physico-chimiques et la matière organique du sol. Mémoire DEA. INPL. Université de Nancy I, 29 p.

Shainberg I and Letey J., 1984. Response of soils to sodic and saline conditions. Hilgardia 52, 1±57.

Sou Y.M., 2009. Recyclage des eaux usées en irrigation : Potentiel fertilisant, risques sanitaires et impacts sur la qualité des sols. Thèse de doctorat : Faculté Environnement naturel, Architectural et construit, Laboratoire d'éco hydrologie Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 178 p.

Thiaw K., 2006. La qualité sanitaire des produits maraîchers de la ville de Ouagadougou : Incidence de la source d'eau d'irrigation sur la santé humaine. Mémoire d'ingénieur pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'équipement rural : 2ie-Burkina, 98 p.

Thiombiano L. et Dianou D., 1999. Activité biologique globale dans trois états de surface de sols sahéliens. Annales de l'Université de Ouagadougou, série B, 8 : 175-187.

Traoré O., 2000. Contribution à l'étude du potentiel de développement de l'agriculture urbaine et périurbaine de la ville de Ouagadougou. Mémoire de fin d'études IDR, UPB. 99 p.

Walinga I; Van Vark W; Houba V.J.G. and Van der lee J.J., 1989. Plant analysis procedures. Dpt. Soil Sc. Plant Nutr. Wageningen Agricultural university. Syllabus, part 7. pp 197-200.

Walkley A. et Black J.A., 1934. An examination of the Detjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromatic acid titration method. *Soil Science* 37, pp29-38.

Wima K., 2002. La valorisation des sous-produits de la station de lagunage à macrophytes flottants (*Pistia stratiotes*) de l'EIER. Réutilisation des eaux usées épurées en irrigation sur les cultures maraîchères : cas de l'aubergine ; 29 p.

Xanthoulis D; Chenini F; Trad M; Rejeb S and Châabouni Z., 2002. Optimisation de la réutilisation des eaux usées traitées en irrigation. Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Rapport de synthèse, 60 p.

Xu De-lan, Zhang C.Y; Shu-ming Q.U; Xu M.A and Gao M-X., 2012. Characterization of microorganisms in the soils with sewage irrigations. *African Journal of Microbiology Research* Vol. 6(44), pp. 7168-7175, 20 November, 2012. 8 p.

Yé L., 2007. Caractérisation des déchets urbains solides utilisables en agriculture urbaine et périurbaine : cas de Bobo-Dioulasso. Mémoire DEA science du sol, 60 p.

Zongo N., 2009. Impact des pesticides et des amendements organiques sur les caractéristiques microbiologiques des sols des agro systèmes de la ville de ouagadougou. Mémoire DEA : Option Sciences du sol. Institut du Développement Rural (IDR) / Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB). 83 p.

ANNEXES

Annexes1 : Normes burkinabè de qualité des sols fixées conformément au décret n°2001-185/PRES/PM/MEE du 7 mai 2001 portant fixation des normes de rejets de polluants dans l'air, l'eau et le sol.

Tableau 7 : Normes burkinabè de qualité des sols

| Paramètres (mg/kg MS ou précisés) | Objectifs qualités | Usage Agricole |
|-----------------------------------|--------------------|----------------|
| pH | 5,5 - 8 | 5,5 - 8 |
| Conductivité électrique | 2 μ S/cm | 2 μ S/cm |
| Taux d'absorption du sodium | 5 | 5 |

Source : Décret n°2001-185/PRES/PM/MEE portant fixation des normes de rejets de polluants dans l'air, l'eau et le sol

Tableau 8: Normes de l'ORSTOM pour l'appréciation qualitative de quelques caractéristiques chimiques des sols tropicaux (Kaboré, 1995 cité par Traoré, 2000).

| En % de sol ou précisé | Très pauvre | Pauvre | Moyen | Riche | Très riche |
|---------------------------------|-------------|-------------|------------|-----------|------------|
| Phosphore assimilable | < 0,03 | 0,03 à 0,05 | 0,05 à 0,1 | 0,1 à 0,2 | > 0,2 |
| Phosphore total | < 0,5 | 0,5 à 1,0 | 1,0 à 1,5 | 1,5 à 3,0 | > 3 |
| Azote total | < 0,5 | 0,5 à 1,0 | 1,0 à 1,5 | 1,0 à 2,5 | > 2,5 |
| Matière Organique | < 10 | 10 à 20 | 20 à 30 | 30 à 40 | > 50 |
| Ca ²⁺ (meq/100g sol) | < 1,0 | 1,0 à 2,3 | 2,3 à 3,5 | 3,5 à 7,0 | >7,0 |
| Na ⁺ (meq/100g sol) | < 0,1 | 0,1 à 0,3 | 0,3 à 0,7 | 0,7 à 2,0 | >2,0 |
| K ⁺ (meq/100g sol) | < 0,1 | 0,1 à 0,2 | 0,2 à 1,4 | 1,4 à 1,8 | >1,8 |
| Mg ²⁺ (meq/100g sol) | < 0,4 | 0,4 à 1 | 1 à 1,5 | 1,5 à 3,0 | >3,0 |
| CEC (meq/100g sol) | < 5 | 5 à 10 | 10 à 25 | 25 à 40 | >40 |

Annexes 2 : Quelques Photos des eaux et sols des sites maraîchers de Ouagadougou



Photo 1: Rejet d'eaux usées le long du canal central (Wayalghin)



Photo 2: Rigole d'eaux usées non traitées (Wayalghin)



Photo 3: Formation de pellicule noire (Kossodo)



Photo 4: Rigole d'eaux de barrage(Boulmiougou)



Photo 5: Réduction de la vitesse d'infiltration (Kossodo)



Photo 6: Rigole d'eaux usées traitées (Kossodo)