



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

FACULTE DES SCIENCES

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

MENTION : CHIMIE

DEPARTEMENT DE CHIMIE MINERALE

ET CHIMIE PHYSIQUE



Mémoire de recherche
pour l'obtention du diplôme de **MASTER II**
Parcours : **CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT**

**CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX D'IRRIGATION DANS
UNE ZONE INTRA-MUROS DE LA COMMUNE URBAINE D'ANTANANARIVO**

Présenté par : **ANDRIANIRINA Setraniaina**

Les membres du jury

Président : Monsieur **RAFENOMANANTSOA Alphonse**
Professeur titulaire

Rapporteur : Monsieur **RANDRIANANTOANDRO Tahina**
Maître de conférences

Examineur : Madame **RAKOTO Nelly Ghislaine**
Maître de conférences
Monsieur **TIANASOA Ramamonjy Manoelson**
Maître de conférences

Date de soutenance : 20 Juin 2015

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier avant tout, Dieu Tout Puissant de nous avoir donné la santé, le courage dans l'accomplissement de ce présent mémoire, qu'Il soit loué pour nous avoir accordé cette vie, et nous permettre d'achever nos études au sein de la Faculté des Sciences, Département de Chimie Minérale et Chimie Physique ; Parcours : Chimie de l'Environnement.

Je souhaiterais exprimer ma plus grande gratitude envers Monsieur Tahina RANDRIANANTOANDRO, Maître de conférences de l'Université d'Antananarivo, d'avoir encadré ce travail. Ses conseils, son dynamisme et ses qualités humaines ont été une source de motivation durant cette étude. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Je remercie vivement l'ensemble des membres du jury :

- *Monsieur RAFENOMANANTSOA Alphonse, Professeur titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire,*
- *Madame RAKOTO Nelly Ghislaine, Maître de conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, qui, malgré ses multiples occupations, a accepté de siéger parmi les membres de jury de ce mémoire,*
- *Monsieur TIANASOA Ramamonjy Manoelson, Maître de conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, qu'Il veut bien croire à ma sincère et respectueuse gratitude en acceptant d'examiner ce travail.*

Enfin, je remercie tout particulièrement mes parents, ma femme et mon fils, mes frères et tous mes amis, sans eux, cela aurait été beaucoup plus difficile ...

MERCI !!!

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
Partie I : GENERALITES SUR LES EAUX USEES ET L'AGRICULTURE URBAINE.....	4
I. DEFINITION.....	5
II. ORIGINE DES EAUX USEES	5
II.1. Les rejets domestiques	5
II.2. Les rejets industriels	5
II.3. Eaux de ruissellement	6
III. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DES EAUX USEES DOMESTIQUES.....	6
III.1. Impact des eaux résiduares sur l'environnement	6
III.2. Réglementation des rejets d'effluents liquides à Madagascar	7
III.3. Critères de qualité des eaux usées pour l'irrigation selon le FAO.....	9
IV. LES EAUX USEES DOMESTIQUES ET L'AGRICULTURE URBAINE.....	10
Partie II : APPROCHE ET METHODE	13
I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	14
I.1. La commune urbaine d'Antananarivo	14
I.2. Caractéristique géographique et population de la CUA	14
I.3. L'agriculture dans la CUA.....	15
I.4. Délimitation de la zone d'étude.....	16
I.5. Caractéristiques du sol du zone d'étude.....	16
II. METHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	19
II.1. Méthodologie générale	19
II.2. Travail sur terrain	20
II.3. Analyses en laboratoire.....	22
III. ECHANTILLONNAGE ET PRELEVEMENTS.....	23
Partie III : INTERPRETATION DES RESULTATS	25
I. LES INDICATEURS DE POLLUTION	26
I.1. Présentation des échantillons.....	26
I.2. La qualité des effluents	26

I.2.1. Les paramètres organoleptiques.....	26
I.2.1.1. Odeur.....	26
I.2.1.2. Couleur.....	26
I.2.2. Les paramètres physico-chimiques.....	27
I.2.2.1. Turbidité.....	27
I.2.2.2. Salinité	28
I.2.2.3. Charges polluantes.....	31
I.2.2.4. Les pollutions azotées et phosphatées	36
I.3. Récapitulation des résultats.....	39
II. INTERET DE LA REUTILISATION DE L’EAU USEE POUR L’AGRICULTURE URBAINE	44
II.1. Les charges domestiques spécifiques	44
II.1.1. Volume d’eaux usées domestiques provenant des quatre sources.....	44
II.1.2. Estimation des charges domestiques générées par habitant	45
II.2. Avantages de l’utilisation des eaux usées à l’irrigation.....	46
II.2.1. Apport des nutriments	46
II.2.2. Avantages économiques	47
Partie IV : IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES DE L’UTILISATION DE L’EAU USEE DOMESTIQUE SUR L’AGRICULTURE URBAINE.....	48
I. AGRICULTURE URBAINE	49
II. IMPACT DES REJETS DOMESTIQUES	50
III. APPROCHE SUR LE PLAN ECONOMIQUE	51
IV. APPROVISIONNEMENT SUR LES MARCHES LOCAUX	52
CONCLUSION	54
BIBLIOGRAPHIE.....	54
ANNEXE	

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1</i> : Composants des eaux usées domestiques et leurs impacts sur l'environnement	7
<i>Tableau 2</i> : Classification des eaux de surface et réglementation des rejets d'effluents liquides	8
<i>Tableau 3</i> : Valeurs limites sur les rejets d'eaux usées	8
<i>Tableau 4</i> : Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation (OMS, 2012)	9
<i>Tableau 5</i> : Norme sur la qualité des eaux d'irrigations (OMS, 1989).....	10
<i>Tableau 6</i> : Principaux ions présents dans les eaux usées domestiques	11
<i>Tableau 7</i> : Classification des eaux selon la conductivité électrique (OMS, 2012)	12
<i>Tableau 8</i> : Répartition par arrondissement de la population et de la superficie de la CUA	14
<i>Tableau 9</i> : Référence sur les teneurs des constituants organiques du sol en agriculture (CIRAD, 2002)	16
<i>Tableau 10</i> : Les paramètres à analyser, les méthodes, les appareillages et les précisions	22
<i>Tableau 11</i> : Localisation des points de prélèvements.....	24
<i>Tableau 12</i> : Grille simplifiée de classification des eaux superficielles (Degrémont, 2005)...	29
<i>Tableau 13</i> : Concentration des composés azotés et phosphatés dans les échantillons E1, E2, E4 et E9	36
<i>Tableau 14</i> : Estimation quantitative du volume d'eaux usées domestiques dans les égouts..	45

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1</i> :	Evolution du nombre d'habitants de la CUA	15
<i>Figure 2</i> :	Localisation de la zone d'étude	17
<i>Figure 3</i> :	La zone d'intervention	18
<i>Figure 4</i> :	La turbidité des eaux usées domestiques et des eaux cressonnières.....	27
<i>Figure 5</i> :	Conductivité électrique des eaux usées des trois parcelles	28
<i>Figure 6</i> :	Concentration des principaux ions dans les échantillons d'eau	30
<i>Figure 7</i> :	Evaluation des charges polluantes dans les eaux	32
<i>Figure 8</i> :	Coefficient de biodégradabilité des effluents domestiques rejetés dans le site...	35
<i>Figure 9</i> :	Teneur en MO des rejets domestiques	35
<i>Figure 10</i> :	Concentrations des composés azotés et phosphatés mesurées dans les trois parcelles	37
<i>Figure 11</i> :	Résultats d'analyses dans la parcelle de référence.....	40
<i>Figure 12</i> :	Teneurs des charges polluantes dans les 4 sources d'eaux usées domestiques .	41
<i>Figure 13</i> :	Teneurs des charges nutritives dans les 4 sources d'eaux usées domestiques ...	42
<i>Figure 14</i> :	Concentration des principaux ions et mesure des conductivités électriques dans les 4 sources de la zone d'étude	43
<i>Figure 15</i> :	Variation journalière du débit Q d'eaux usées d'une collectivité urbaine.	44
<i>Figure 16</i> :	Charges domestiques spécifiques (DCO et DBO ₅)	45
<i>Figure 17</i> :	Charges domestiques spécifiques (P _t - N _t)	46
<i>Figure 18</i> :	Circuits de vente des produits issus de la zone d'étude	53

LISTE DES PHOTOS

<i>Photo 1</i> :	Photos prises pour représenter la qualité des eaux usées domestiques et des eaux cressonnières	21
<i>Photo 2</i> :	Quelques échantillons	23
<i>Photo 3</i> :	Cressonnières dans le vallon d'Ambanidia	49
<i>Photo 4</i> :	Mode de consommation des cressons dans la vie quotidienne.....	50

LISTE DES ABREVIATIONS

BDA	Bureau de Développement d'Antananarivo urbain
CE	Conductivité électrique
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer
CUA	Commune Urbaine d'Antananarivo
DBO ₅	Demande Biochimique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DRPE	Direction de la Recherche et de la Planification d'Eau
FAO	Food and Agricultural Organization
INSTAT	Institut national de la statistique
MES	Matières en suspension
MO	Matières Organiques
OD	Oxygène dissous
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PUDi	Plan d'Urbanisme Directeur
SAA	Spectrophotométrie d'Absorption Atomique
SAR	Sodium Absorption Ratio
TDS	Taux de salinité (teneur en sels dissous)
UPDR	Unité de Politique de Développement Rural

INTRODUCTION

L'eau est l'un des éléments fondamentaux de notre environnement et de première nécessité pour les êtres vivants. Elle est également essentielle aux activités humaines : domestique, agricole et industrielle.

Le volume d'eau utilisée dans le monde a progressé deux fois plus que le taux de croissance de la population. On estime que, dans les 50 années à venir, plus de 40 % de la population mondiale vivront dans des pays confrontés à un stress hydrique ou à la rareté de l'eau (OMS, 2012). Comme à Madagascar, la croissance démographique ne cesse d'augmenter, la consommation d'eau devient très importante. En 2011, le bureau de développement d'Antananarivo urbain (BDA) affirme que la population totale de l'agglomération de la commune urbaine d'Antananarivo est estimée à 1 335 182 d'habitants. L'urbanisation est caractérisée par une grande consommation d'eau ainsi que la qualité d'eaux usées domestiques rejetées dans les milieux naturels. La pollution de l'eau survient lorsque des matières organiques ou inorganiques, même des matières solides (exemple : déchets plastiques) sont déversées dans l'eau qui en dégrade la qualité physico-chimique, ce qui rend son utilisation dangereuse et perturbe le milieu aquatique.

D'innombrable pays en développement et pays industrialisés utilisent les eaux usées en agriculture. Dans la commune urbaine d'Antananarivo, les eaux usées sont utilisées sans traitement pour irriguer les cultures. Cette utilisation est principalement motivée par la rareté grandissante des ressources en eau et par la croissance démographique. Les eaux usées constituent souvent une source d'eau fiable tout au long de l'année. Elles contiennent et constituent une forme importante de recyclage des nutriments, nécessaires à la croissance des végétaux. L'utilisation des eaux usées constitue beaucoup d'avantages comme la réduction de l'utilisation des engrais chimiques, la diminution de l'impact environnemental (OMS, 2012).

Par contre, l'utilisation des eaux usées peut entraîner des effets nocifs sur l'environnement et des risques sanitaires. Les eaux usées contiennent divers agents pathogènes, dont un grand nombre sont capables de survivre dans les milieux aquatiques, sur les cultures ou dans le sol (OMS, 2012)

La diversité de l'agriculture (la riziculture, la cressiculture et le maraîchage) dans l'agglomération d'Antananarivo est liée à l'accès à la ressource en eau. Cette dernière est menacée en quantité et en qualité par les besoins urbains (C.Aubry, 2006). Notre étude a été effectuée dans une zone intra-muros de la commune urbaine d'Antananarivo. Le principal objectif est de fournir des informations sur la quantité et la qualité physico-chimique des eaux

usées domestiques utilisées en agriculture. Des analyses socio-économiques ont été effectuées.

Des descentes sur le terrain ont été effectuées en faisant un diagnostic technique du site, des échantillonnages, des enquêtes auprès des agriculteurs et une mesure des débits des rejets. Les enquêtes auprès des agriculteurs permettent d'analyser les impacts socio-économiques de l'utilisation des eaux usées domestiques en agriculture. Des échantillons d'eaux usées domestiques et des eaux cressonnières ont été prélevés et analysés dans des laboratoires pour évaluer le degré de la pollution dans la zone d'étude et déterminer la quantité des nutriments, des matières organiques, ainsi que quelques ions majeurs. Des comparaisons de ces résultats par rapport aux normes malagasy et aux normes internationales ont été effectuées.

L'étude est subdivisée en quatre grandes parties :

- La première partie concerne une étude bibliographique sur la réutilisation des eaux usées domestiques en agriculture urbaine, l'aspect environnemental, les normes et les réglementations sur les eaux d'irrigation.
- La deuxième partie présente la méthodologie adoptée à cette étude, une présentation de la zone d'étude et une description globale des échantillons et des prélèvements.
- La troisième partie présente les résultats.
- La dernière partie concerne l'étude des impacts socio-économiques de l'utilisation de l'eau usée domestique sur l'agriculture urbaine.

**Partie I : GENERALITES SUR LES EAUX USEES
ET L'AGRICULTURE URBAINE**

I. DEFINITION

Une eau usée, appelée encore effluent ou eau résiduaire est une eau qui a subi un changement défavorable des caractéristiques naturelles (biologiques ou physico-chimiques) après usage. La pollution des eaux est due à des activités humaines.

II. ORIGINE DES EAUX USEES

En milieu urbain, les eaux usées sont générées quotidiennement par les ménages, les institutions, les commerces et les industries. Toutefois, leurs caractéristiques varient en fonction du type d'utilisation. Mais en général on peut classer les eaux usées en trois origines : les eaux domestiques, les eaux industrielles et les eaux de ruissellement.

II.1. Les rejets domestiques

Les eaux usées d'origine domestique sont issues de l'utilisation de l'eau (potable dans la majorité des cas) par chaque individu.

Lorsque les habitations sont en zone d'assainissement collectif, les eaux domestiques sont rejetées dans les égouts publics. Les eaux de cuisine contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques, (glucides, lipides protides), et des détergents. Les eaux de buanderie, contenant principalement des détergents ; des eaux de salle de bains chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement de matières grasses hydrocarbonées. Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires, très chargées en composés azotés, phosphorés, en microorganismes et en matières organiques hydrocarbonées (urée, acide urique et créatinine). Une personne produit en moyenne 0,8 à 1,5 litres d'urine par adulte et par jour. En générale, la concentration d'azote dans l'urine est environ de 3 à 7 grammes par litre. Le phosphore dans l'urine est sous une forme disponible pour les plantes (Richert, 2011).

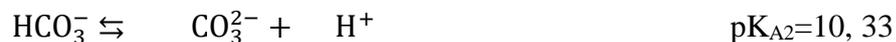
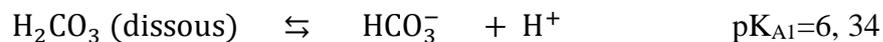
II.2. Les rejets industriels

Les eaux usées industrielles sont très variées en termes de quantité et de qualité. Leurs caractéristiques dépendent du type d'industrie (par exemple : industrie textile, industrie agro-alimentaire, industrie pétrolière). Les rejets industriels contiennent des éléments nocifs. Les plus importants sont les métaux lourds comme le cuivre, le zinc, le plomb (OMS, 2012).

II.3. Eaux de ruissellement

Pendant la saison de pluie, les eaux pluviales sont aussi une source de pollution importante des eaux de surface. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'atmosphère (par exemple : acidification des pluies). Puis pendant le ruissellement, elle emporte des résidus déposés sur les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus des matières plastiques et métaux lourds).

En contact de CO₂ atmosphérique, l'eau de pluie forme des composés acides selon les réactions chimiques suivantes:



Avec : K_H: Constante de Henry

K_A : Constante d'acidité

III. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DES EAUX USEES DOMESTIQUES

III.1. Impact des eaux résiduaires sur l'environnement

Les eaux usées domestiques et les eaux usées industrielles ont des caractéristiques très différentes. Les eaux usées industrielles sont émises par des industries dont certains procédés utilisent ou génèrent des produits chimiques toxiques. Les rejets industriels déversés directement dans le milieu naturel constituent des risques pour la santé et sur l'environnement.

Néanmoins l'utilisation des eaux usées domestiques pour l'irrigation comporte moins de danger pour l'environnement. La qualité de ces eaux détermine les impacts environnementaux (OMS, 2012). Les eaux usées domestiques contiennent des nutriments utilisables par les végétaux. Les matières organiques peuvent améliorer la structure du sol et sa fertilité. Mais, les eaux usées urbaines contiennent un excès de nutriments, surtout des éléments azotés et phosphatés. Ces éléments ont pour conséquences la destruction des ressources vivantes, le déséquilibre des milieux physiques, biologiques et des écosystèmes aquatiques à travers la croissance des algues « eutrophisation ». (H. Keddal, 2008)

Le *tableau 1* résume l'impact sur l'environnement de l'utilisation des eaux usées domestiques.

Tableau 1: Composants des eaux usées domestiques et leurs impacts sur l'environnement

COMPOSANTS DES EAUX USEES DOMESTIQUES	IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT
<i>Métaux lourds</i>	- accumulation de métaux lourds dans la couche de terre arable
<i>Sels</i>	- accroissement de la salinité des sols : entraîne une toxicité ionique spécifique (ions sodium ou ion chlorure) - modification de la pression osmotique au niveau de la zone de racines en raison de la forte concentration de sel. - diminution de la productivité
<i>Agents pathogènes (bactéries, helminthes, protozoaires et virus)</i>	- contamination des cultures, des sols, des eaux de surface et des eaux souterraines. - contamination de l'aquifère.

Source : (OMS, 2012)

III.2. Réglementation des rejets d'effluents liquides à Madagascar

Selon le ministère de l'environnement Malagasy, le décret n° 2003/464 du 15/04/03 portant classification des eaux de surface et réglementation, permet de caractériser les rejets d'effluents liquides. L'article 3 : les eaux de surface (cours d'eau, lacs et tous plans d'eau) sont classées de la manière suivante:

- Classe A: bonne qualité, usages multiples possibles
 - Classe B: qualité moyenne, loisirs possibles, baignade pouvant être interdite
 - Classe C: qualité médiocre, baignade interdite
 - HC: hors classes, contamination excessive, aucun usage possible à part la navigation.
- La présence de germes pathogènes désigne directement une catégorie hors classes. C'est le paramètre le plus mauvais qui déterminera la classe d'une eau donnée.

Tableau 2: Classification des eaux de surface et réglementation des rejets d'effluents liquides

PARAMETRES	CLASSE A	CLASSE B	CLASSE C	HORS CLASSES
FACTEURS BIOLOGIQUES ET BACTERIOLOGIQUES				
<i>Oxygène dissous (mg/l)</i>	OD \geq 5	3<OD<5	2<OD \leq 3	OD<2
<i>DBO₅ (mg/l)</i>	DBO<5	5<DBO \leq 20	20<DBO<70	DBO>70
<i>DCO (mg/l)</i>	DCO \leq 20	20<DCO \leq 50	50<DCO \leq 100	DCO>100
<i>Présence de Germes pathogènes</i>	Non	Non	Non	Oui
FACTEURS PHYSICO-CHIMIQUES				
<i>Température (°C)</i>	T<25	25 \leq T \leq 30	30 \leq T \leq 35	T>35
<i>pH</i>	6,0 \leq pH \leq 8,5	5,5<pH<6,0 ou 8,5<pH<9,5	pH \leq 5,5 ou pH \geq 9,5	
<i>MES (mg/l)</i>	MES<30	30 \leq MES<60	60 \leq MES<100	MES>100
<i>CE (μS/cm)</i>	CE \leq 250	250< CE<500	500< CE<3000	CE > 3000

Source : Ministère de l'Environnement, 2003

L'article 5 du décret n° 2003/464 du 15/04/03 portant la classification des eaux de surface et réglementation des rejets d'effluents liquides recommande que les rejets d'eaux usées doivent être incolores, inodores et respectent la qualité suivante:

Tableau 3: Valeurs limites sur les rejets d'eaux usées

PARAMETRES	UNITE	NORMES
FACTEURS PHYSIQUES		
<i>pH</i>		6,0 - 9,0
<i>Conductivité électrique</i>	μ S/cm	200
<i>Matières en suspension</i>	mg/l	60
<i>Température</i>	°C	30
<i>Turbidité</i>	NTU	25
FACTEURS CHIMIQUES		
<i>Dureté totale comme CaCO₃</i>	mg/l	180,0
<i>NTK (azote total Kjeldahl)</i>	mg/l-N	20,0
<i>Phosphates comme PO₄³⁻</i>	mg/l	10,0
FACTEURS BIOLOGIQUES		
<i>DCO</i>	mg d'O ₂ /l	150
<i>DBO₅</i>	mgd'O ₂ /l	50

Source : Ministère de l'Environnement, 2003

III.3. Critères de qualité des eaux usées pour l'irrigation selon le FAO

A Madagascar, les eaux usées sont utilisées directement en agriculture. Or, d'après la FAO et l'OMS, les eaux d'irrigation doivent respecter les normes internationales.

Le *tableau 4* présente les directives générales pour évaluer l'eau usée, utilisée à des fins d'irrigation.

Tableau 4: Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation (OMS, 2012)

Problèmes potentiels en irrigation	Unité	Degré de restriction à l'usage		
		Aucun	Légère modéré	Sévère
Salinité				
CE	dS/m	<0,7	0,73-3,0	> 3,0
TDS	mg/l	<450	450-2000	>2000
Infiltration				
SAR= 0 - 3 et CE =	dS/m	>0,7	0,7 - 0,2	<0,2
SAR= 3- 6 =		>1,2	1,2 - 0,3	<0,3
SAR= 6 -12 =		>1,9	1,9 - 0,5	<0,5
SAR= 12 -20 =		>2,9	2,9 - 1,3	<1,3
SAR= 20-40 =		>5,0	5,0 - 2,9	<2,9
Toxicité spécifique des ions				
Sodium				
Irrigation de surface	SAR	<3	3 - 9	>9
Irrigation par aspersion	méq/l	<3	>3	
Chlorure				
Irrigation de surface	méq/l	<4	4-10	>10
Irrigation par aspersion	méq/l	<3	>3	>3,0
pH gamme normale 6,5 – 8,4				

Tableau 5: Norme sur la qualité des eaux d'irrigations (OMS, 1989)

<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	<i>Normes</i>
pH	-	6.5 à 8.5
CE	μS/cm	<300
MES	mg/l	<70
DCO	mg/l	<40
DBO ₅	mg/l	<30
Cl ⁻	mg/l	1065
Ca ²⁺	mg/l	400
Na ⁺	mg/l	920
Mg ²⁺	mg/l	60,75
NH ₄ ⁺	mg/l	<2
NO ₃ ⁻	mg/l	<50
NO ₂ ⁻	mg/l	<1
PO ₄ ³⁻	mg/l	<0,94

IV. LES EAUX USEES DOMESTIQUES ET L'AGRICULTURE URBAINE

Les eaux usées utilisées pour irrigation contiennent des quantités élevées en substances chimiques en solution par rapport aux eaux qui proviennent des forages ou des eaux de source. En effet, les eaux usées sont susceptibles de réduire les rendements des cultures et de détériorer la fertilité des sols.

Dans la zone urbaine, les eaux usées domestiques contiennent une forte concentration en sels à cause de la présence des nombreux latrine publique, des lavoirs, des garages au voisinage des champs de culture. Les principaux ions trouvés dans les eaux usées domestiques sont présentés dans le *tableau 6*.

Tableau 6: Principaux ions présents dans les eaux usées domestiques

IONS	SYMBOLES	POIDS EQUIVALENT [g/mol]
ANIONS		
Chlorure	Cl ⁻	35,5
Nitrate	NO ₃ ⁻	62
Nitrite	NO ₂ ⁻	46
Phosphates	PO ₄ ³⁻	95
CATIONS		
Sodium	Na ⁺	23
Potassium	K ⁺	39,1
Calcium	Ca ²⁺	40,1
Magnésium	Mg ²⁺	24,3

On rappelle que les concentrations des ions sont exprimées en mg/l (ou ppm) et milliéquivalents par litre (méq/l). Cette dernière unité est préférable car les critères de qualité de l'eau impliquent des calculs en milliéquivalents par litre (méq/l).

La salinité constitue le principal critère d'évaluation de la qualité d'une eau destinée à l'irrigation. Elle est parfois évaluée par la mesure de la conductivité électrique. Les eaux usées dont la salinité est trop forte peuvent donner lieu à l'accumulation de sels dans la zone de racines des cultures et endommager certaines cultures. Les ions spécifiques tels que le chlorure, le sodium, le bore sont toxiques pour certaines cultures (FAO, 2003).

Tableau 7 : Classification des eaux selon la conductivité électrique (OMS, 2012)

CE [μS/cm]	SALINITE	CLASSE
CE < 250	Eaux non salines	Eaux utilisables pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols. Léger lessivage nécessaire, mais il se produit en irrigation normale sauf en sol très peu perméable
250 < CE < 750	Eaux à salinité moyenne	Eaux utilisables avec léger lessivage. Les plantes modérément tolérantes aux sels peuvent pousser.
750 < CE < 2250	Eaux à forte salinité	Eaux utilisables pour les sols à drainage restreint, plantes ayant une bonne tolérance aux sels.
CE > 2250	Eaux à très forte salinité	Peuvent être utilisées exceptionnellement sur des sols très perméables avec un bon drainage. L'eau sera utilisée en excès pour provoquer un fort lessivage du sol.

Partie II : APPROCHE ET METHODE

I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. La commune urbaine d'Antananarivo (CUA)

Antananarivo est une commune urbaine située dans la région Analamanga, l'une des 22 régions de Madagascar. Cette région fait partie des Hautes Terres Centrales du pays avec un climat tropical d'altitude supérieure à 900 mètres. Située en son centre, et s'étendant sur une superficie de 17 464 km², soit environ 3 % de la superficie de Madagascar, la Région Analamanga compte 134 Communes et 8 Districts : Antananarivo Renivohitra, Antananarivo Atsimondrano, Antananarivo Avaradrano, Andramasina, Anjozorobe, Manjakandrina, Ambohidratrimo et Ankazobe. Elle est délimitée par 5 Régions : Betsiboka au Nord, Vakinankaratra au Sud, Alaotra Mangoro à l'Est, Itasy et Bongolava à l'Ouest. La commune Urbaine d'Antananarivo est composée de six arrondissements (UPDR, 2003).

I.2. Caractéristique géographique et population de la CUA

La région Analamanga est marquée par la dominance des sols alluviaux. Ces derniers n'occupent qu'une place limitée, se rencontrant dans les cuvettes, comme les plaines d'Antananarivo contenant de la riziculture, de la cressiculture et des cultures maraichères.

Antananarivo est une ville tropicale d'altitude (1 250 à 1 450 m) avec une topographie marquée par des marais, des collines et des bas-fonds. La CUA a une superficie de 107 km², soit 1% de la superficie de la Région Analamanga.

Selon le dernier recensement général de la population (en 2011), on compte dans la commune urbaine d'Antananarivo un total de 1 335 182 habitants, dont la répartition est donnée dans le *tableau 8*.

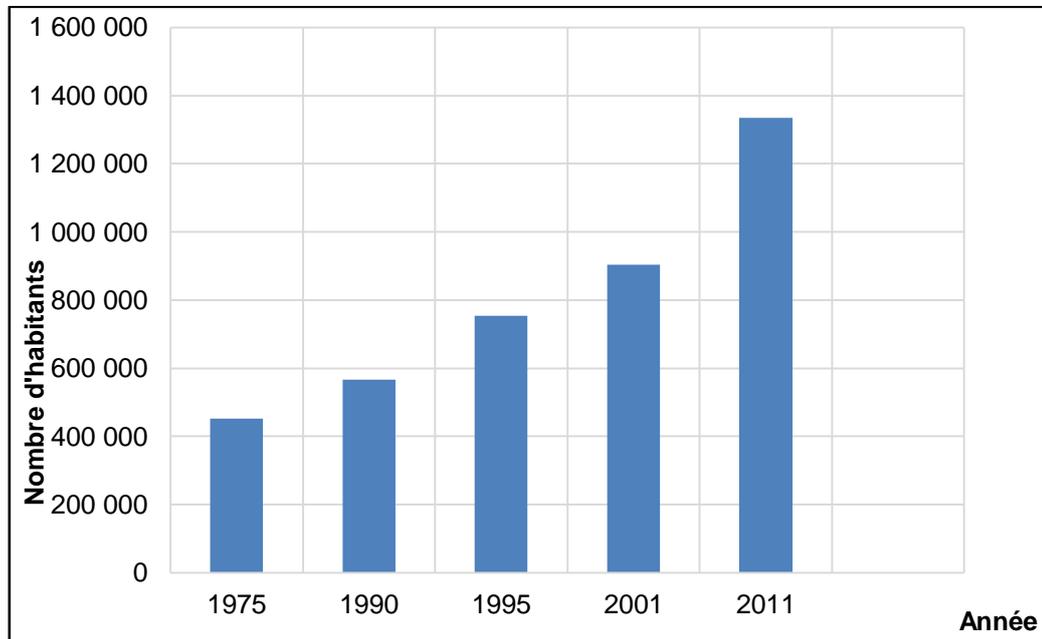
Tableau 8: Répartition par arrondissement de la population et de la superficie de la CUA

<i>Arrondissement</i>	<i>Nombre d'habitants</i>	<i>Superficie (en km²)</i>
I	282 694	8,89
II	179 132	14,02
III	143 467	6,69
IV	232 360	13,00
V	342 091	23,94
VI	155438	19,45
TOTAL	1 335 182	86

Source : (BDA, 2011)

La population est fortement concentrée dans la CUA. Cette pression démographique résulte du phénomène d'urbanisation qui attire la population des autres régions.

Figure 1 : Evolution du nombre d'habitants de la CUA



I.3. L'agriculture dans la CUA

Selon l'Institut National de la Statistique (INSTAT), la population agricole représentait environ 18 % de la population de la Communauté Urbaine d'Antananarivo. L'agriculture dans l'agglomération se caractérise par des exploitations de petite taille (rarement supérieures à 1 ha) et une forte diversité des activités. Les activités agricoles dépendent de la localisation géographique du terrain et des possibilités d'accès en eau. L'agriculture occupe des grands espaces dans la commune urbaine d'Antananarivo avec une superficie de 29,61 km² dont la culture humide occupe 27,07 km² et la culture sèche 2,54 km² (PUDI, 2004). Le climat de la région d'Analamanga est favorable aux exigences des cultures humides surtout les cressons. La période allant de mars à octobre est une bonne saison pour cette production avec une température assez fraîche.

Dans la CUA, l'agriculture a un faible rendement mais est compétitive. Pour le cas de la riziculture, le rendement est de l'ordre de 1,5 à 2,5 t/ha. Cette valeur est comparable à la moyenne des rendements rizicoles à Madagascar 2,1 t/ha. A Antananarivo urbaine, les cultures maraîchères ont un rendement assez élevé par rapport aux autres zones concurrentes. (M.H Dabat, 2006).

I.4. Délimitation de la zone d'étude

Notre zone d'étude fait partie de la commune urbaine d'Antananarivo. Elle se situe dans le deuxième et le quatrième arrondissement. Elle est limitée au Nord par le quartier d'Ambanidia, au Sud par le village d'Ankaditoho-Tsimbazaza, à l'Est par les quartiers de Volosarika, Ambatoroka, Fenomanana, Andrangaranga, Morarano et à l'Ouest par Miandrarivo, Manakambahiny, Marohoho. Pour effectuer l'étude, le site est subdivisé en trois parcelles car il possède une grande superficie cultivable et est irrigué par des eaux usées domestiques.

I.5. Caractéristiques du sol du zone d'étude

La matière organique du sol est composée à la fois d'azote et de carbone. La décomposition des MO du sol est estimée par le rapport C/N.

Tableau 9 : Référence sur les teneurs des constituants organiques du sol en agriculture (CIRAD, 2002)

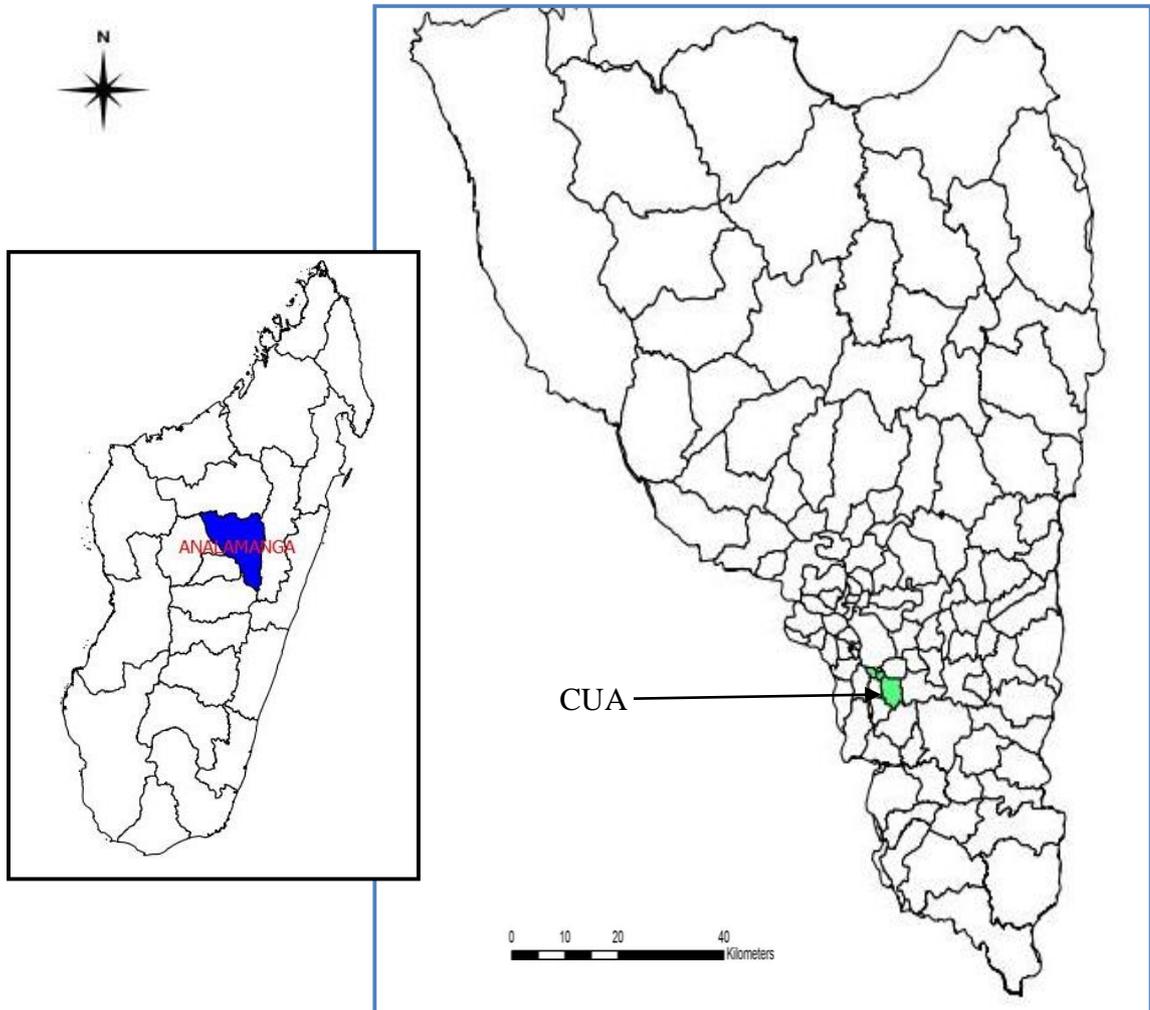
Teneur (%)	Très pauvre	Pauvre	Moyen	Riche	Très riche
M.O	<0,3	0,3 à 0,6	0,6 à 1,7	1,7 à 3	>3
C	<0,5	0,5 à 1	1 à 3	3 à 5	>5
N	<0,05	0,05 à 0,1	0,1 à 0,15	0,15 à 0,25	>0,25

L'étude des sols dans notre zone d'étude montre que la structure du sol est limoneuse et le rapport C/N est de l'ordre de 10, cela signifie que les matières organiques sont bien décomposées. (Ramahazomanana, 2008).

Figure 2 : Localisation de la zone d'étude

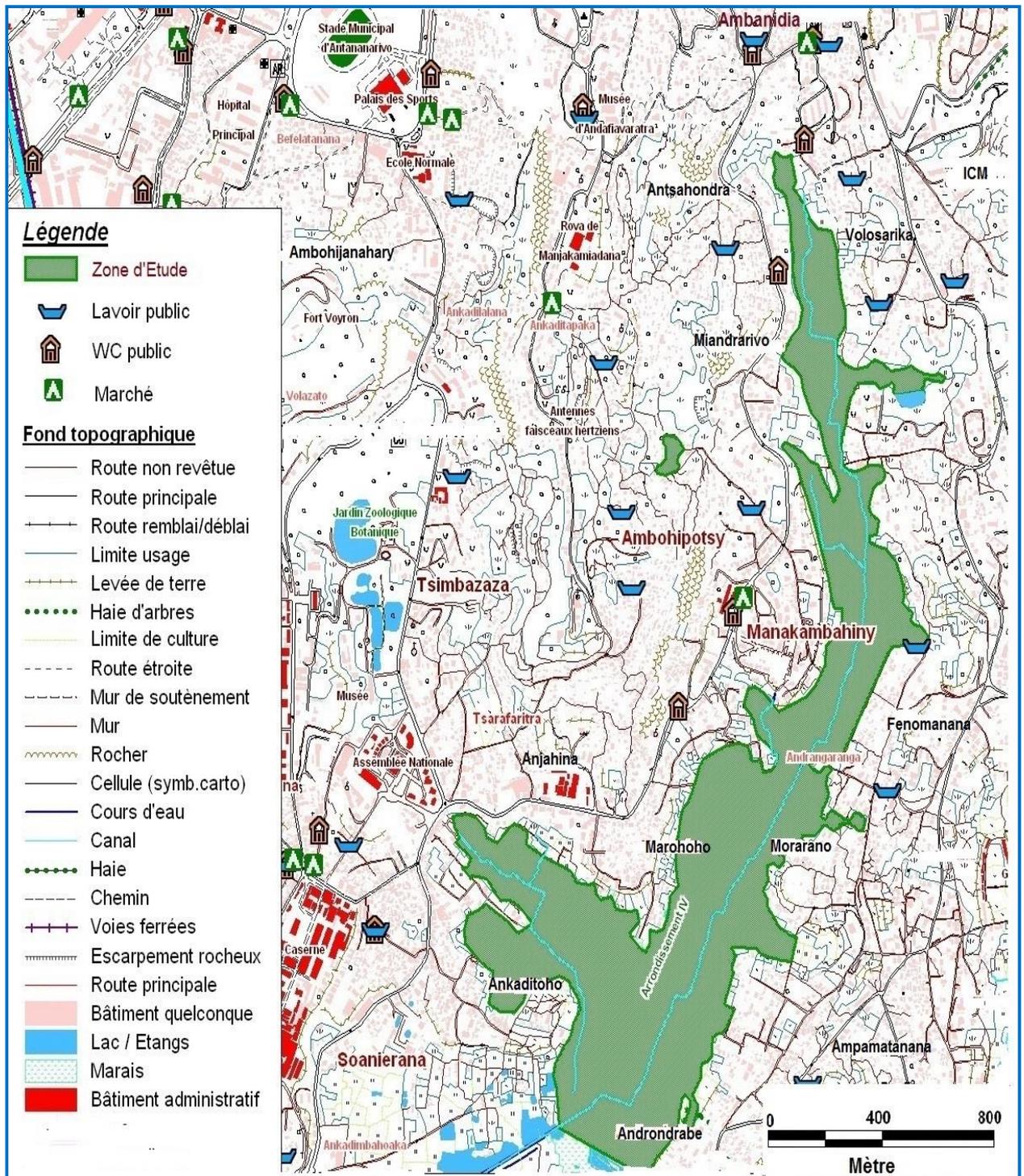
MADAGASCAR

REGION ANALAMANGA



Source : Auteur

Figure 3 : La zone d'intervention



Source : (BDA, 2011)

II. METHODOLOGIE DE RECHERCHE

II.1. Méthodologie générale

➤ Choix du site

La CUA possède des vallons cultivables surtout la culture de cressons et la culture maraîchère. La zone où l'on a fait cette étude a été choisie parmi ces vallons de la CUA avec les caractéristiques suivantes :

- elle est très vaste avec une superficie de 27 ha,
- elle est irriguée par les eaux usées domestiques brutes sans traitement,
- elle présente des produits agricoles très diversifiés.

➤ Phase préliminaire

Avant de descendre sur le site, une étude bibliographique a été effectuée, ainsi que la préparation des enquêtes auprès des agriculteurs, des chefs quartiers et des personnels administratifs.

➤ Travail sur terrain

Des descentes sur le site ont été effectuées en visitant les parcelles. Des enquêtes auprès des agriculteurs, des prélèvements d'eaux et des mesures de débit d'eaux usées ont été effectuées. L'étude a été réalisée durant la saison sèche.

➤ Travaux en laboratoires

Des analyses des échantillons d'eaux ont été effectuées dans des laboratoires. Ces analyses permettent d'évaluer les indicateurs globaux de pollution : DBO, DCO, MES, MO. Les analyses permettent aussi d'estimer la quantité des éléments azotés et phosphorés dans les eaux ainsi que la teneur de quelques ions majeurs.

➤ Interprétations des résultats

- Diagnostic de la qualité des eaux usées d'irrigation
- Evaluation des impacts de la réutilisation des eaux usées sur l'agriculture et analyses des impacts-socio-économiques.

II.2. Travail sur terrain

L'étude concerne la pollution d'un site situé dans la Commune Urbaine d'Antananarivo. Elle aborde la qualité des effluents destinés à l'irrigation et des eaux cressonnières. Les études permettent d'analyser si ces eaux respectent la norme malagasy et les normes internationales. La descente sur terrain a été effectuée pendant la saison sèche (mois de Juin, Juillet et Août 2014). Durant cette saison, les rejets sont de nature domestiques. En saison de pluie, les eaux sont mélangées avec des eaux de ruissellement d'où la difficulté de certaines études comme l'estimation des charges domestiques.

Une mesure des débits des rejets domestiques a été effectuée. La méthode utilisée est la méthode par exploration du champ de vitesse dans une section droite d'écoulement : la vitesse de l'écoulement est déterminée en différents points de la section. Le débit Q (m^3/s) s'écoulant dans un canal d'évacuation est défini par la relation (J.Rodier, 2009):

$$Q = \frac{V}{t}$$

Avec :

- V : volume d'eau dans une section ayant une longueur L , une largeur l et une hauteur h .
- t : durée de passage d'un petit solide de masse négligeable dans cette section.

La visite des parcelles de la zone informe qu'elle est polluée car les eaux d'irrigation contiennent un excès de matières organiques. Les eaux usées d'irrigation ont une origine domestique et ont une odeur désagréable (mélange d'eaux vannes et d'eaux ménagères). Les canaux d'irrigation sont bouchés par des déchets solides (sachets et bouteilles plastiques). La prolifération des algues et des plantes comme les azolas dans les cultures confirme que les eaux usées des sites contiennent des concentrations d'azotes et de phosphates élevées (OMS, 2012).

Photo 1 : Photos prises pour représenter la qualité des eaux usées domestiques et des eaux cressonnières



Eaux usées domestiques venant de
Tsimbazaza - Marohoho



Eaux usées domestiques venant de Faliarivo-
Ambanidia



Prolifération des algues dans les
cressonnières



Culture de Ti-sam (Volosarika)

Source : Auteur

II.3. Analyses en laboratoire

Les analyses en laboratoire permettent d'évaluer la qualité physico-chimique des rejets et des eaux cressonnières ainsi que d'évaluer les intérêts agronomiques.

Tableau 10: Les paramètres à analyser, les méthodes, les appareillages et les précisions

<u>PARAMETRES</u>	<u>METHODES</u>	<u>APPAREILLAGES</u>	<u>PRECISIONS</u>
<i>Température</i>	Electrométrie	Thermomètre	± 0,1
<i>Turbidité</i>	Néphélogétrie	Turbidimètre	± 0,02
<i>pH</i>	Electrométrie	pH-mètre	± 0,01
<i>Conductivité</i>	Conductimétrie	Conductimètre	± 0,02
<i>MES</i>	Filtration	Filtre sous vide	± 0,1
<i>Calcium</i>	Titrimétrie	-	-
<i>Magnésium</i>	Titrimétrie	-	-
<i>MO</i>	Manganimétrie	-	-
<i>Ammonium</i>	Spectrométrie	Spectromètre	± 0,01
<i>Chlorure</i>	Titrimétrie	-	-
<i>Sulfates</i>	Spectrométrie	Spectromètre	± 0,01
<i>Nitrite</i>	Spectrométrie	Spectromètre	± 0,01
<i>Nitrate</i>	Spectrométrie	Spectromètre	± 0,01
<i>Phosphates</i>	Spectrométrie	Spectromètre	± 0,01
<i>DCO</i>	Titrimétrie	Bloc réfrigérant	± 5
<i>DBO₅</i>	Manométrie	DBO-mètre	± 1

Les analyses ont été effectuées au laboratoire de la JIRAMA et au laboratoire de pédologie de la FOFIFA ainsi que dans notre laboratoire de chimie de l'environnement.

Les échantillons sont conservés dans des bouteilles en plastiques bien rincées. Durant le travail, il est nécessaire de porter des gants pour éviter la transmission des parasites.

Photo 2 : Quelques échantillons



III. ECHANTILLONNAGE ET PRELEVEMENT

Les prélèvements ont été effectués durant la saison sèche (Juin-Août 2014). Les quatre points de prélèvement ont été choisis au point de rejet, c'est-à-dire dans les égouts d'évacuation d'eau usée des quartiers périphériques de la zone d'étude. Les prélèvements des eaux cressonnières ont été effectués dans quatre cressicultures distinctes (*tableau 11*).

Lors de notre étude, la zone d'intervention est subdivisée en trois parcelles. La parcelle 1 est composée des quartiers périphériques: Ambavahadimitafo, Faliarivo, Ambanidia, Ambatoroka, Volosarika, Miandrarivo, Manakambahiny et Fenomanana. La parcelle 2 est composée de deux quartiers : Andrangaranga et Morarano. Et la parcelle 3 est délimitée par les quartiers de Tsimbazaza-Marohoho et d'Ankaditoho.

Tableau 11 : Localisation des points de prélèvements

ECHANTILLON		LOCALISATION			
Notation		Nature	Quartier	Longitude	Latitude
	Eréf	Eau de source	Ambavahadimitafo	47°32'11.52"E	18°55'19.13"S
PARCELLE 1	E1	Eau usée d'irrigation	Faliarivo Ambanidia	47°32'15.58"E	18°55'18.85"S
	E2	Eau usée d'irrigation	Ambatoroka Volosarika	47°32'20.64"E	18°55'27.67"S
	E3	Eau cressonnière	Antsahondra Volosarika	47°32'15.24"E	18°55'20.67"S
	E4	Eau usée d'irrigation	Miandrarivo Manakambahiny	47°32'18.84"E	18°55'36.56"S
	E5	Eau cressonnière	Fenomanana	47°32'23.09"E	18°55'56.86"S
PARCELLE 2	E6	Eau cressonnière	Andrangaranga	47°32'14.86"E	18°56'6.95"S
	E7	Eau cressonnière	Morarano	47°32'11.43"E	18°56'15.85"S
PARCELLE 3	E8	Eau cressonnière	Marohoho Ankaditoho	47°31'51.48"E	18°56'12.88"S
	E9	Eau usée d'irrigation	Marohoho Ankaditoho	47°31'43.24"E	18°56'9.55"S

Partie III : INTERPRETATION DES RESULTATS

I. LES INDICATEURS DE POLLUTION

Des analyses en laboratoire des rejets domestiques ont été effectuées durant cette étude. L'indication des paramètres globaux (indicateurs de pollution) nous permet d'évaluer le degré de pollution sur le site. La même opération a été faite pour les eaux cressonnières.

I.1. Présentation des échantillons

La majorité des eaux d'irrigation dans notre zone d'étude proviennent des eaux usées d'origine domestique. L'échantillon Eréf est considéré comme référence qui provient de l'eau de source située à Ambavahadimitafo. Les échantillons E1, E2, E4 et E9 représentent les eaux usées domestiques utilisées en agriculture. Ces rejets proviennent des quartiers périphériques de la zone d'étude. Les échantillons E3, E5, E6, E7 et E8 sont des échantillons représentatifs des eaux cressonnières.

I.2. La qualité des effluents

I.2.1. Les paramètres organoleptiques

I.2.1.1. Odeur

Les visites sur la zone d'étude nous ont permis de déterminer les propriétés organoleptiques des eaux usées. L'odeur est l'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif ; elle est due aux substances volatiles, des matières en suspension, des protozoaires (J. Rodier, 2009). Les rejets domestiques ont des odeurs nauséabondes. Les effluents venant de Manakambahiny et de Volosarika ont des odeurs très mauvaises parce que ces rejets sont composés en majeure partie des eaux de vannes.

I.2.1.2. Couleur

La couleur est due à certaines impuretés minérales (comme le fer) mais également à certaines matières organiques. Les matières organiques provenant de la décomposition des matières végétales ou animales sont le premier responsable de la couleur des eaux usées. A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que les bactéries, les planctons, les algues et les virus. La couleur des eaux venant des quartiers Volosarika (E2) et Manakambahiny (E4) a une couleur grise. Le développement excessif d'algues modifie la couleur et augmente la turbidité des eaux de surface.

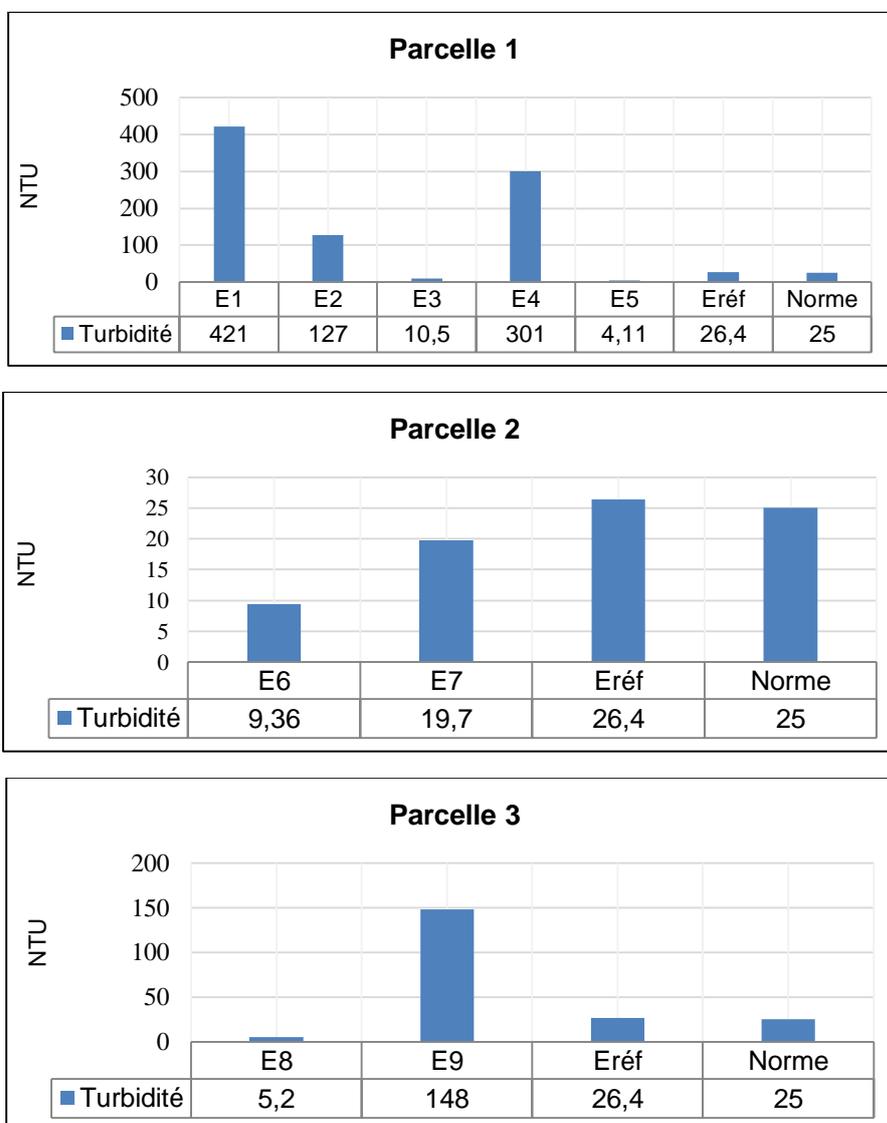
I.2.2. Les paramètres physico-chimiques

Les résultats d'analyse des échantillons des rejets domestiques et des eaux cressonnières des trois parcelles désignent les paramètres globaux indicateurs de pollution. Le but de ces analyses est d'estimer les charges polluantes et la toxicité de certains ions de l'effluent qui risquent d'affecter la qualité des milieux récepteurs (eaux et sol).

I.2.2.1. Turbidité

Les particules en suspension sont responsables de la turbidité ou de l'opacité de l'eau. La turbidité donne une première indication sur la teneur en matières colloïdales d'origine minérale ou organique (J. Rodier, 2009)

Figure 4 : La turbidité des eaux usées domestiques et des eaux cressonnières

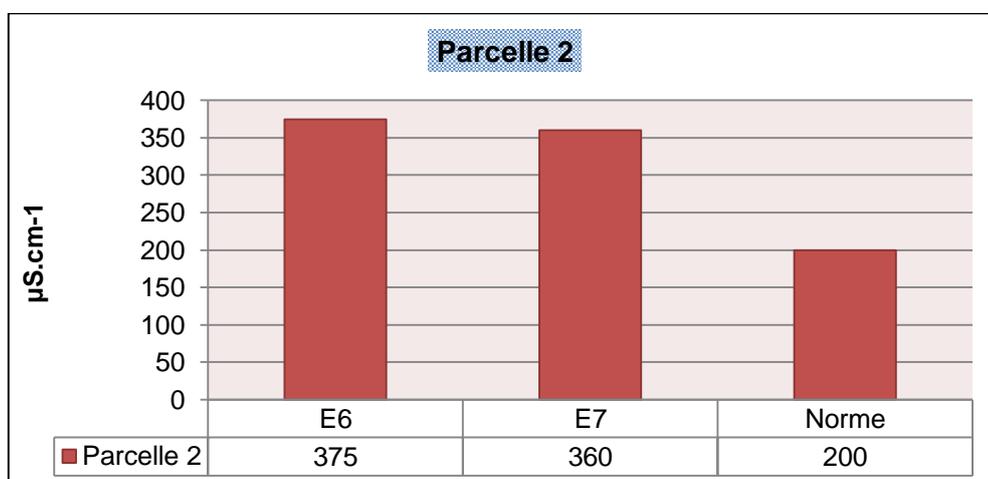
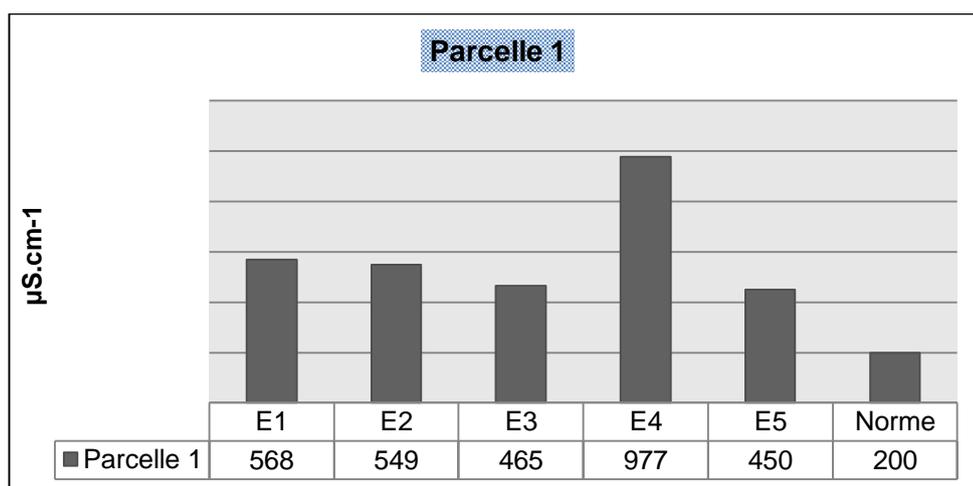


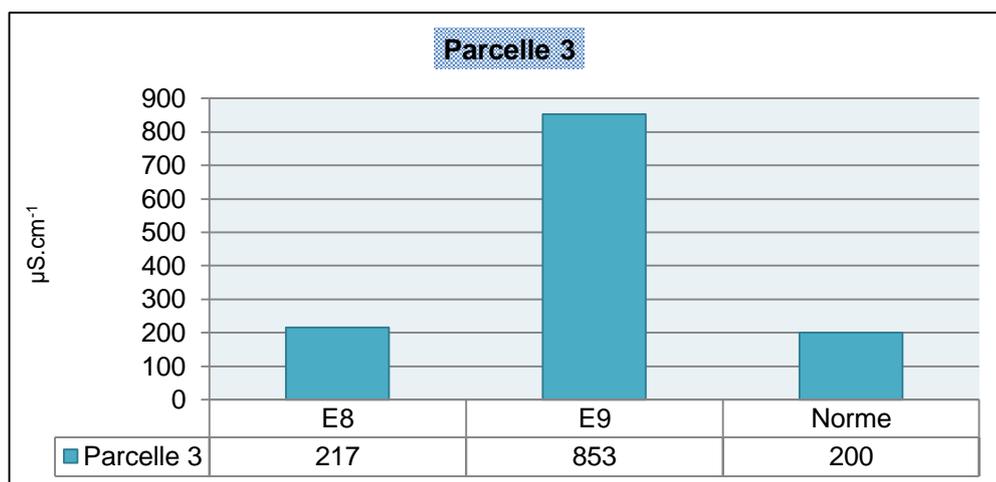
La turbidité des rejets domestiques est très élevée. Dans la parcelle 1, la turbidité de l'eau varie de 127 NTU (E2) à 421 NTU (E1). Ces valeurs montrent que les rejets sont très pollués et ne respectent pas la norme malagasy des rejets d'effluents liquides (25 NTU). Le rejet de la parcelle 3 présente aussi une turbidité 6 fois plus élevée que la norme malagasy des rejets. Ces valeurs indiquent l'importance de la charge polluante, caractérisée par les matières organiques et inorganiques dissoutes et en suspension dans les rejets.

I.2.2.2. Salinité

La salinité d'une eau correspond à sa concentration en sels dissous. Elle est exprimée par la valeur de la conductivité électrique (CE). Les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} sont les ions responsables de la salinité. Les détergents, les eaux vannes sont les principales sources de sels.

Figure 5: Conductivité électrique des eaux usées des trois parcelles





Les valeurs des conductivités électriques obtenues mettent en évidence la minéralisation très importante des eaux usées, avec une valeur maximale de $977\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour la parcelle 1 et de $217\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ comme valeur minimale pour la parcelle 3. Ces valeurs dépassent largement la norme malagasy ($200\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). La conductivité est due de la solubilité dans l'eau des acides et des bases inorganiques principalement les détergents. En solution, ces produits génèrent des ions comme les sulfates, les chlorures, le sodium et le calcium (OMS, 2012).

Le taux de sel élevé peut entraîner à long terme une diminution de la productivité et une toxicité ionique spécifique (ions sodium, ou chlorure). De plus, la CE élevée perturbe l'absorption par les végétaux des nutriments essentiels, en raison de l'antagonisme avec les ions sodium, chlorure et sulfates.

En se référant à la grille de classification des eaux superficielles de la DRPE, la conductivité électrique trouvée dans les sources E1, E2, E3 et E4 sont de qualité « bonne », les valeurs se situent entre 400 à $1300\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Tableau 12 : Grille simplifiée de classification des eaux superficielles (Degrémont, 2005)

Paramètres	CE [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]
Très bonne	< 400
Bonne	400 - 1 300
Moyenne	1 300 - 2 700
Mauvaise	2 700 - 3 000
Très mauvaise	> 3 000

Lorsque les eaux usées sont valorisées en irrigation, le paramètre SAR (Sodium Adsorption Ratio) exprime l'activité relative des ions sodium dans les réactions d'échange

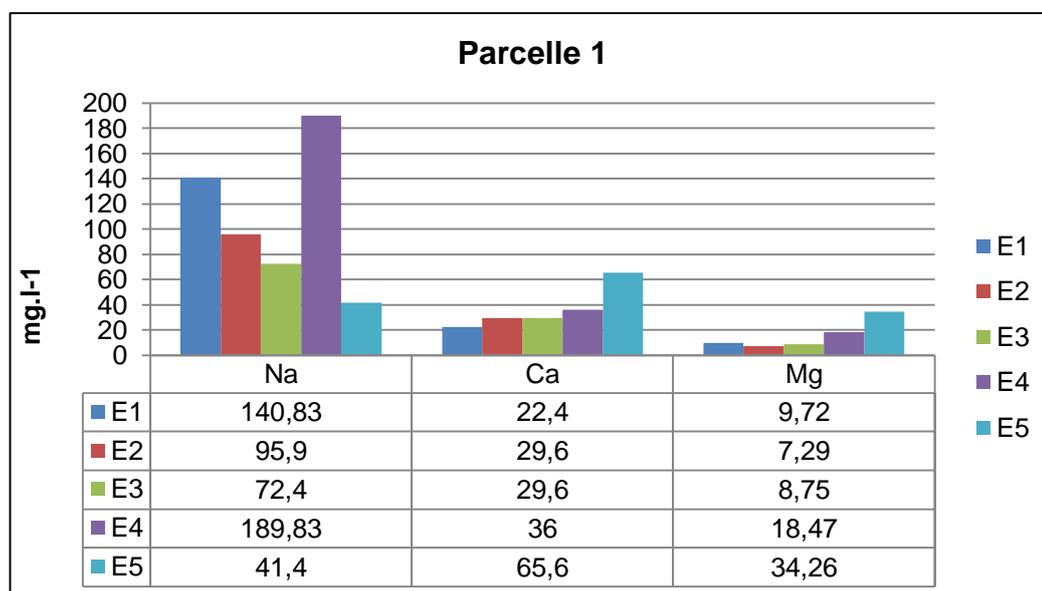
dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium échangeables. Généralement, le SAR et la conductivité électrique de l'eau d'irrigation sont utilisés en combinaison afin d'évaluer le risque potentiel de salinisation des sols.

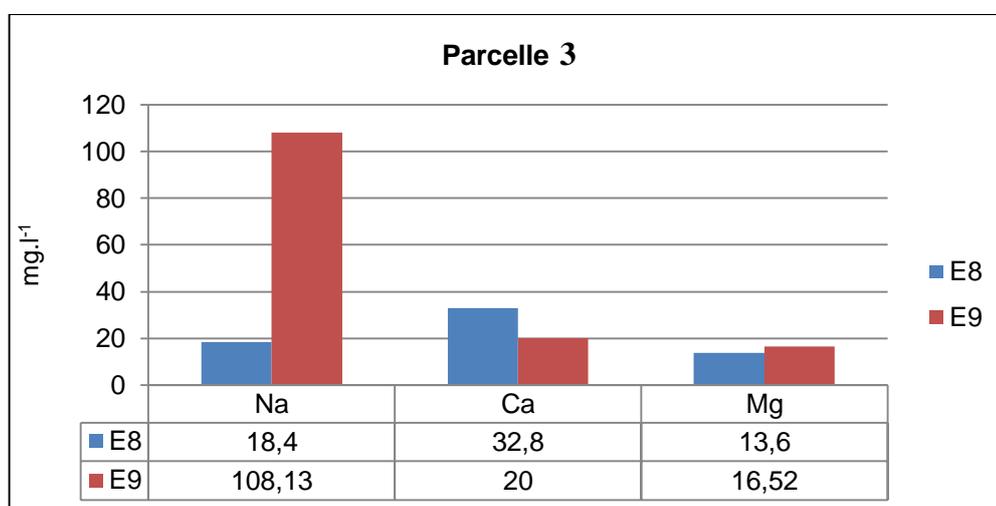
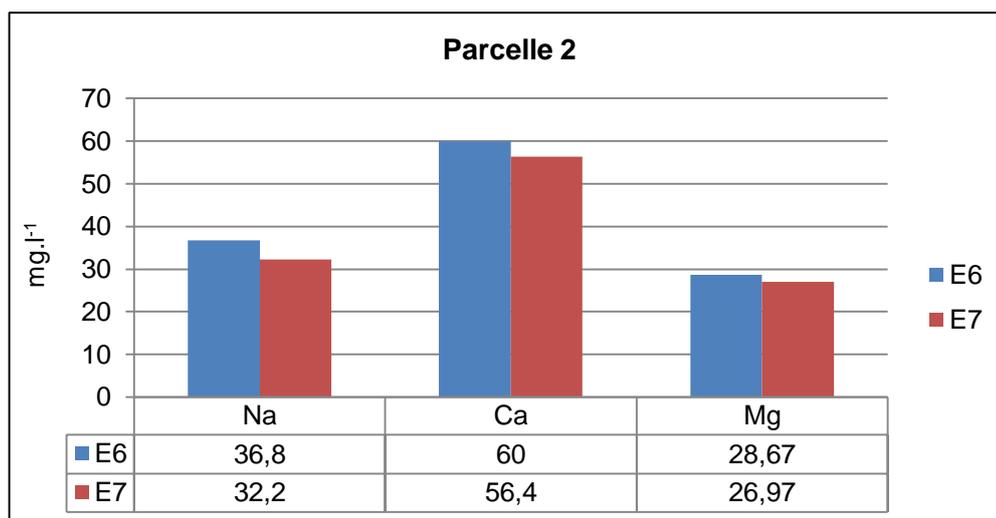
Le SAR indique le rapport de la concentration d'ions sodium à la somme des concentrations d'ions calcium et magnésium dans le sol. Il peut être calculé par la formule suivante :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}}{2}}}$$

La salinité d'eaux usées d'irrigation entraîne la teneur élevée en sel dans le sol. Elle peut entraîner à long terme une diminution de la productivité. La salinité est mesurée de manière indirecte par une série de paramètres, tels que la conductivité, les concentrations des ions sodium et de chlorure. (OMS, 2012).

Figure 6: Concentration des principaux ions dans les échantillons d'eau





On observe, dans la parcelle 1, un taux très élevé en ions sodium de 189,83mg .l⁻¹ (E4) tandis que les taux en ions sodium trouvé dans la parcelle 2 et parcelle 3 sont proportionnels au taux de magnésium. Il est à signaler que le taux en ion sodium doit être inférieur aux concentrations en ion calcium et ion magnésium pour éviter la salinité excessive et l'imperméabilité du sol.

L'échantillon E1 présente une forte concentration en ion sodium. Cette concentration est très élevée par rapport aux concentrations d'ions calcium et ion magnésium. Ceci montre que le taux de sel dans E1 est élevé.

I.2.2.3. Charges polluantes

Les paramètres utilisés dans le contrôle de la pollution organique provenant des effluents sont la demande biochimique en oxygène (DBO), la demande chimique en oxygène (DCO) et les matières en suspensions (MES).

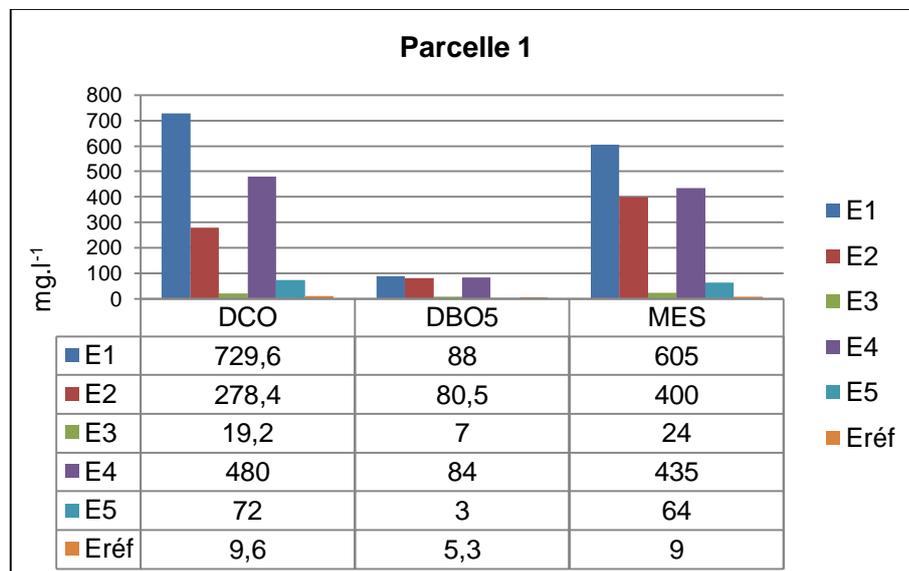
Rappelons que :

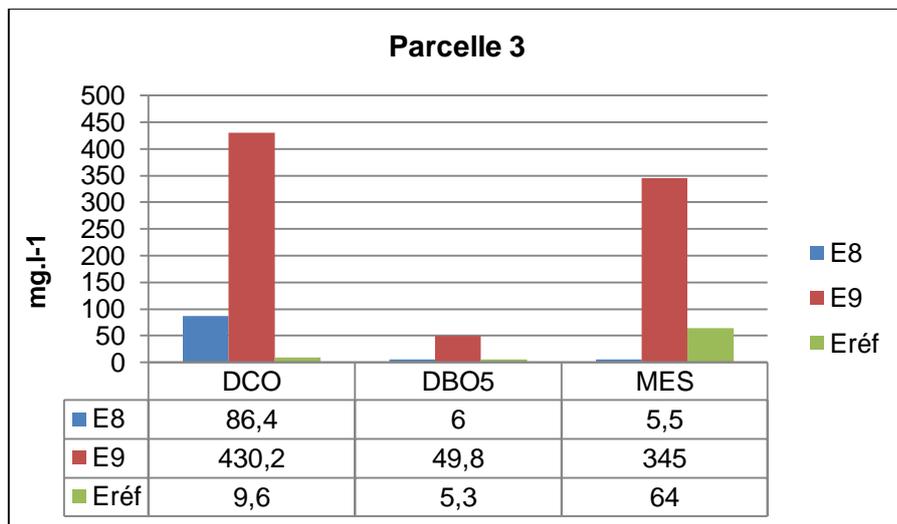
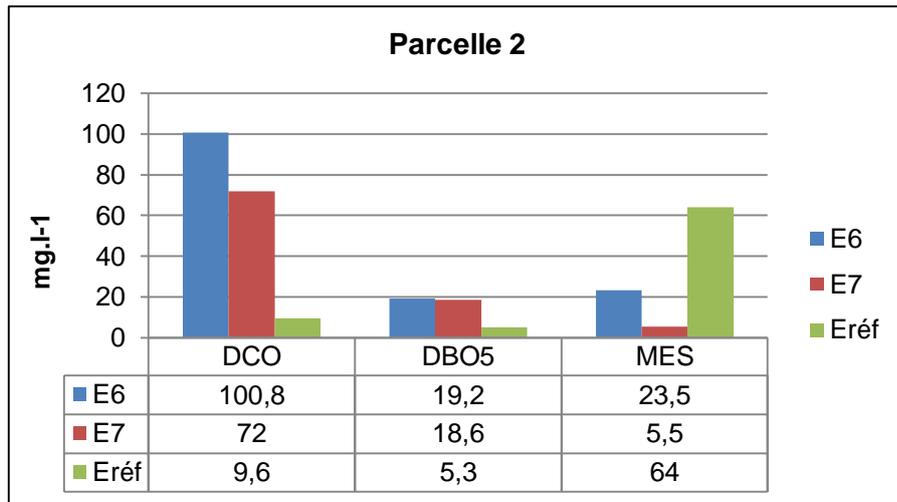
- La DBO est la mesure de la quantité d'oxygène requise pour oxyder la matière organique de même que la matière inorganique dans un échantillon aqueux.
- La DCO est la mesure de la quantité d'oxygène requise pour oxyder la matière organique et inorganique oxydable contenue dans un échantillon. Ce paramètre donne une estimation de la quantité de polluants présents dans un effluent une eau usée.
- La biodegradabilité des matières organiques présentes dans un effluent est exprimé par le coefficient « k » telle que : $k = \text{DCO} / \text{DBO}$.
 - Si $k = 1,5$: cela montre que les matières oxydables sont en grande partie de matières fortement biodégradables ;
 - Si $1,5 < k \leq 2,5$: cela signifie que les matières oxydables sont moyennement biodégradables ;
 - Si $2,5 < k \leq 3$: les matières oxydables sont peu biodégradables ;
 - Si $k > 3$: les matières oxydables sont non biodégradables ;
 - Une valeur très élevée de k montre la présence des éléments inhibiteurs de la croissance bactérienne comme les sels métalliques, les détergents, les hydrocarbures (Belghyti, 2009).

La relation entre la DBO et la DCO est donnée par l'équation suivante :

$$\text{MO} = \frac{2\text{DBO}_5 + \text{DCO}}{3}$$

Figure 7: Evaluation des charges polluantes dans les eaux





Les matières en suspension

Les matières en suspension représentent l'ensemble des particules organiques et minérales contenues dans les eaux. Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution. Les matières en suspension sont généralement de nature biodégradable. Dans le site témoin (Eréf), la valeur trouvée dans cette parcelle respecte la norme de rejet malagasy (au voisinage de 60mg.l⁻¹).

La parcelle 1 est alimentée par trois sources d'eaux usées (E1, E2 et E3), la teneur en MES dans ces trois sources est élevée par rapport à celle mesurée dans les eaux cressonnières. Les valeurs de MES dans les rejets domestiques varient de 400mg.l⁻¹ (E2) à 605mg.l⁻¹ (E1), tandis que dans les eaux cressonnières on a trouvé 9mg.l⁻¹ (E5) et 24mg.l⁻¹ (E3). La teneur en

matières en suspensions dans les rejets domestiques dépasse largement la norme malagasy d'où il est souhaitable de traiter ces effluents avant de rejeter dans les eaux de surfaces. Ces valeurs indiquent la présence importante des charges polluantes que ce soit inorganique ou organique des eaux. Il semble donc que le site est pollué par des produits non biodégradables. Les valeurs élevées en MES dans les trois échantillons (E1, E2 et E3) sont probablement liées à la charge en matières minérales à savoir le sable, limon, argile.

Les eaux prélevées dans la parcelle 2 présentent des valeurs normales en MES par rapport à la norme malagasy des rejets et la norme FAO ($<70 \text{ mg.l}^{-1}$) des eaux d'irrigation. Elles varient de $5,5 \text{ mg.l}^{-1}$ (E7) et $23,5 \text{ mg.l}^{-1}$ (E6). La teneur en MES dans les eaux cressonnières respectent la norme malagasy des rejets.

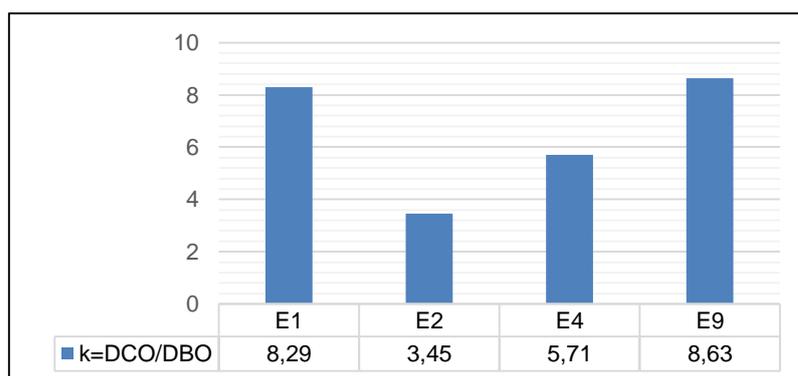
Les teneurs en MES dans la parcelle 3 sont de 345 mg.l^{-1} (E9) et 11 mg.l^{-1} (E8). E9 représente l'échantillon d'eau usée domestique venant du quartier Tsimbazaza-Maroho, la teneur en MES mesurée est élevée par rapport à la teneur en MES dans l'eau cressonnière (E8).

DCO et DBO

D'après le décret n° 2003/464 du Ministère de l'environnement pour la réglementation des rejets d'effluents liquides, les rejets doivent respecter les valeurs en DCO ($>150 \text{ mg.l}^{-1}$) et en DBO ($>50 \text{ mg.l}^{-1}$).

Dans la parcelle 1, la DCO varie de $278,4 \text{ mg.l}^{-1}$ (E2) à 730 mg.l^{-1} (E1). Tandis que dans la parcelle 3, on a trouvé une valeur de $430,2 \text{ mg.l}^{-1}$ (E9). Les valeurs élevées en DCO trouvées dans ces deux parcelles sont dus par l'évacuation d'eau de vanne des quartiers périphériques et les rejets venant des lavoirs publics. Les eaux usées provenant des échantillons E1, E2, E4 et E9 sont utilisés pour irriguer des cultures maraichères. Les DCO pour les eaux cressonnière dans le site oscillent de $19,2 \text{ mg.l}^{-1}$ (E3) à $78,4 \text{ mg.l}^{-1}$ (E5), ces valeurs respectent la norme Malagasy des rejets ($<150 \text{ mg.l}^{-1}$).

Figure 8: Coefficient de biodégradabilité des effluents domestiques rejetés dans le site

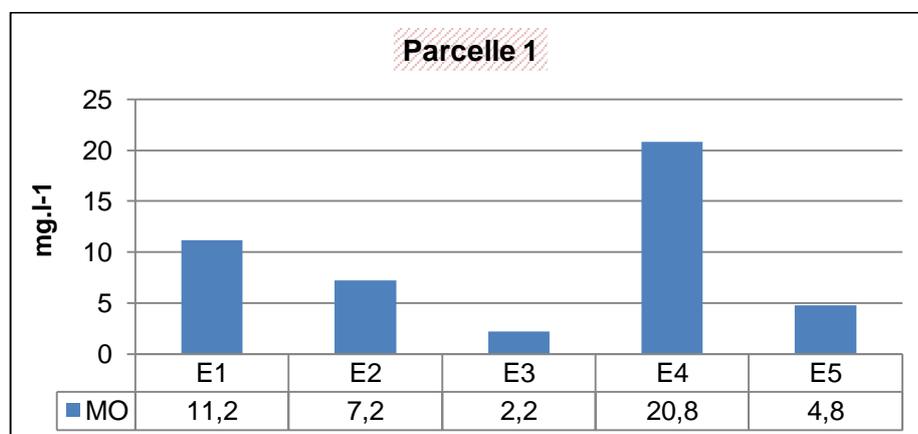


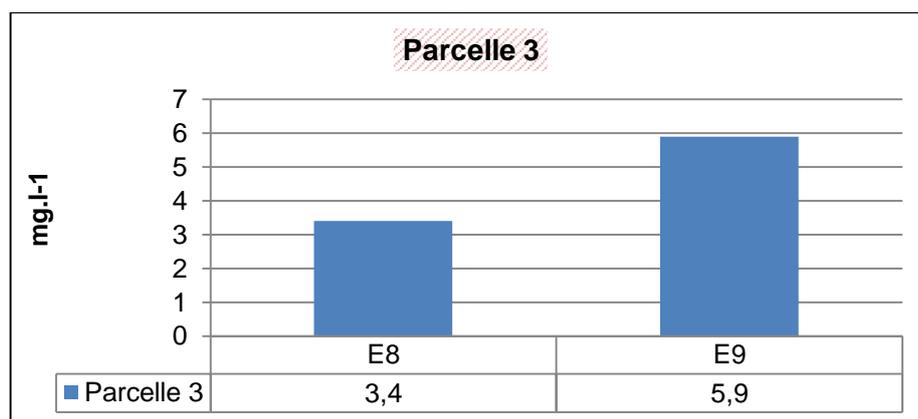
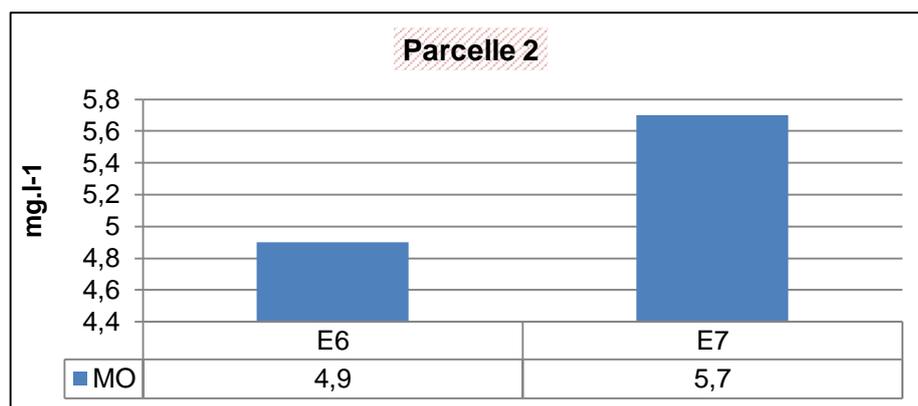
Le ratio DCO/DBO pour les eaux usées domestiques est généralement compris entre 1,25 et 2,5. Les valeurs obtenues dans E1, E2, E4 et E9 sont toutes supérieures à 3, ceux-ci montrent que les eaux usées contiennent des matières organiques difficilement biodégradables. Ces résultats montrent qu'il est nécessaire de faire un traitement physico-chimique des eaux usées avant d'être réutilisées en irrigation. Ce ratio élevé pourrait s'expliquer par la présence importante des matières minérales.

Les matières organiques

La plupart des composés organiques d'origine humaine, animale ou végétale contenus dans les eaux usées se décomposent rapidement dans les sols. En conditions aérobies, la décomposition est généralement plus rapide, plus complète qu'en conditions anaérobies. Il se forme des composés organiques stables et non toxiques, tels que les acides humiques et fulviques (OMS, 2012).

Figure 9: Teneur en MO des rejets domestiques





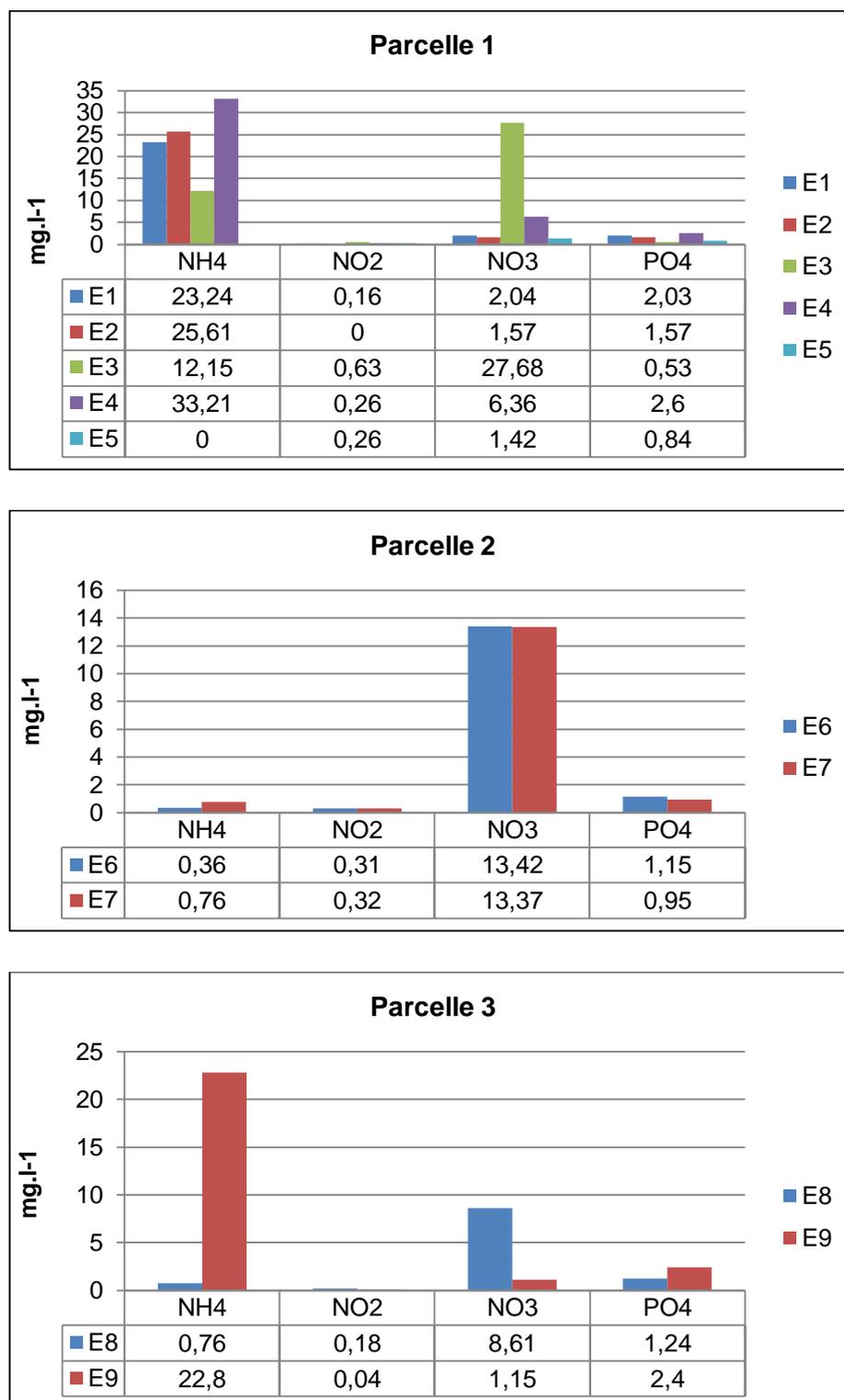
Les eaux usées domestique dans la parcelle 1 contiennent des matières organiques élevées : sa concentration oscille de $7,2\text{mg.l}^{-1}$ (E2) à $20,8\text{mg.l}^{-1}$ (E4). Les concentrations significatives en matières organiques dans les eaux usées venant du quartier Faliarivo-Ambanidia, Ambatoroka-Volosarika et Manakambahiny entraînent une odeur nauséabonde des rejets domestiques surtout lorsqu'elles stagnent en surface. La présence excessive des matières organiques provoque des difficultés de transport et de distribution des effluents ainsi que l'obturation des systèmes d'irrigation. Cela est trouvé dans le quartier Miandrarivo-Manakambahiny.

I.2.2.4. Les pollutions azotées et phosphatées

Tableau 13: Concentration des composés azotés et phosphatés dans les échantillons E1, E2, E4 et E9

Paramètres	Unité	E1	E2	E4	E9
NO_2^-	mg.l^{-1}	0,16	0,04	0,26	0,04
NO_3^-	mg.l^{-1}	2,04	0	6,36	1,55
NH_4^+	mg.l^{-1}	23,24	25,61	33,21	22,8
PO_4^{3-}	mg.l^{-1}	2,03	1,57	2,6	2,4

Figure 10: Concentrations des composés azotés et phosphatés mesurées dans les trois parcelles



Les composés azotés

L'azote est présent dans les effluents sous différentes formes dissoutes: azote organique (Norg), azote ammoniacal (NH_3), ion ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^-), nitrites

(NO_2^-). La somme des concentrations d'azote sous l'ensemble des diverses formes donne l'azote total (N_t).

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en nitrites dans les eaux usées d'irrigation et dans les eaux cressonnières sont très faibles. Les valeurs se situent entre $0,04\text{mg.l}^{-1}$ et $0,26\text{mg.l}^{-1}$. Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque où la nitrification n'était pas conduite à son terme, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiant à des températures élevées. Ces valeurs respectent la norme internationale des eaux destinées à l'irrigation, inférieure à 1mg.l^{-1} . La faible concentration en nitrites mesurée dans les effluents domestiques pourrait être expliquée par le fait que l'ion NO_2^- est un composé intermédiaire, instable en présence de l'oxygène, dont la concentration est généralement très inférieure à celle des deux formes qui lui sont liées, l'ion nitrate et ammonium (Belghyti, 2009)

Les teneurs en nitrates mesurées dans les eaux usées domestiques varient entre 0 et $6,36\text{mg.l}^{-1}$. Probablement, elles sont dues au fait que l'azote contenu dans les eaux mg.l^{-1} résiduaires domestiques est essentiellement d'origine humaine. On estime environ 13g par jour d'azote rejeté par un être humain adulte, sous forme organique, présent dans l'urine. Tandis que la concentration en nitrates dans les eaux cressonnières est assez élevée par rapport aux eaux usées domestiques, ceci est dû à l'utilisation d'engrais et des fumiers. L'azote dans les rejets domestiques est utilisé pour les cultures. Sa demande oscille entre 50 et 350 kg d'azote par hectare. Les valeurs en nitrates respectent la norme OMS ($<50\text{mg.l}^{-1}$). La concentration de nitrates s'est accrue en raison de la conversion de l'azote organique et ammoniacal en nitrates. (Hogg, 2009)

Les résultats obtenus montrent que la concentration en NH_4^+ dans les effluents domestiques est élevée par rapport à la concentration en NH_4^+ des eaux cressonnières. Ils sont de $23,24\text{mg.l}^{-1}$ (E1) ; $25,61\text{mg.l}^{-1}$ (E2) ; $33,21\text{mg.l}^{-1}$ (E4) et $22,8\text{mg.l}^{-1}$ (E9). Ces valeurs dépassent la norme des rejets destiné à l'irrigation selon l'OMS ($<2\text{mg.l}^{-1}$).

Les phosphates

Le phosphore peut être présent dans les eaux usées, soit sous forme d'orthophosphates, soit sous forme de polyphosphates ou de phosphore organique. On parle aussi de phosphore total qui correspond à la somme de toutes les formes de phosphore. L'ion orthophosphate est la forme la plus abondante dans l'eau et provient en majeure partie des produits de lessives.

Les eaux cressonnières contiennent des teneurs assez élevées en phosphates. Ces concentrations varient de $0,53\text{mg.l}^{-1}$ (E3) à $1,24\text{mg.l}^{-1}$ (E8). La concentration en phosphates dans les eaux usées de la parcelle 1 varie de $1,57\text{mg.l}^{-1}$ (E2) à $2,5\text{mg.l}^{-1}$ (E4) ; tandis que dans la parcelle 3, elle est de $2,4\text{mg.l}^{-1}$ (E9). La teneur élevée en phosphates entraîne des impacts négatifs sur les cultures. La concentration en phosphates mesurée est largement supérieure à la norme internationale de rejets ($<0,94\text{ mg/l}$). L'étude montre que la charge élevée des phosphates dans les eaux usées domestiques provient du métabolisme humain. Un homme excrète entre 1 et 2 grammes de phosphore par jour (Richert, 2011).

La concentration élevée en azote et phosphore provoque cependant une prolifération excessive d'algues. En milieux estuariens, les marées vertes sont une des conséquences les plus visibles des surplus d'azote. L'azote est clairement identifié comme facteur déterminant du contrôle de la prolifération d'algues.

I.3. Récapitulation des résultats

Les figures suivantes récapitulent les résultats trouvés dans les 4 sources d'eaux usées domestiques (E1, E2, E4 et E9) ainsi que dans la parcelle de référence (E_{réf.}). Elles montrent les teneurs en charges polluantes : DBO₅, DCO et MES (exprimé en mg.l^{-1}), la teneur en composés azotés et phosphatés (exprimé en mg.l^{-1}) et la concentration de quelques ions ainsi que la conductivité électrique (exprimé en $\mu\text{S.cm}^{-1}$).

Les valeurs de la DBO₅, la DCO et la MES sont comparées à la norme malagasy des rejets d'effluents liquides. Les autres paramètres sont comparés à la norme de l'OMS (Tableau 5).

Figure 11 : Résultats d'analyses dans la parcelle de référence

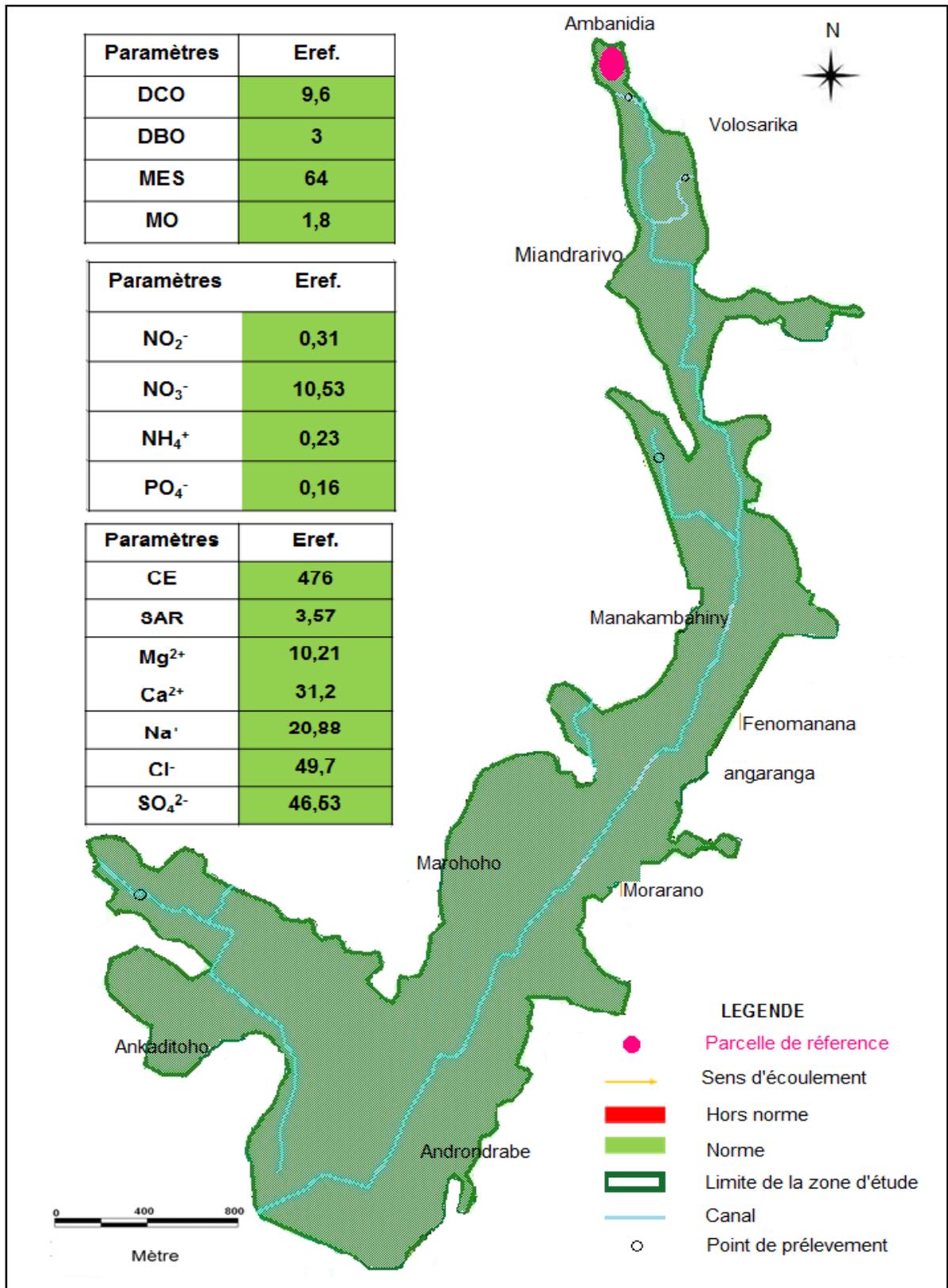


Figure 12 : Teneurs des charges polluantes dans les 4 sources d'eaux usées domestiques

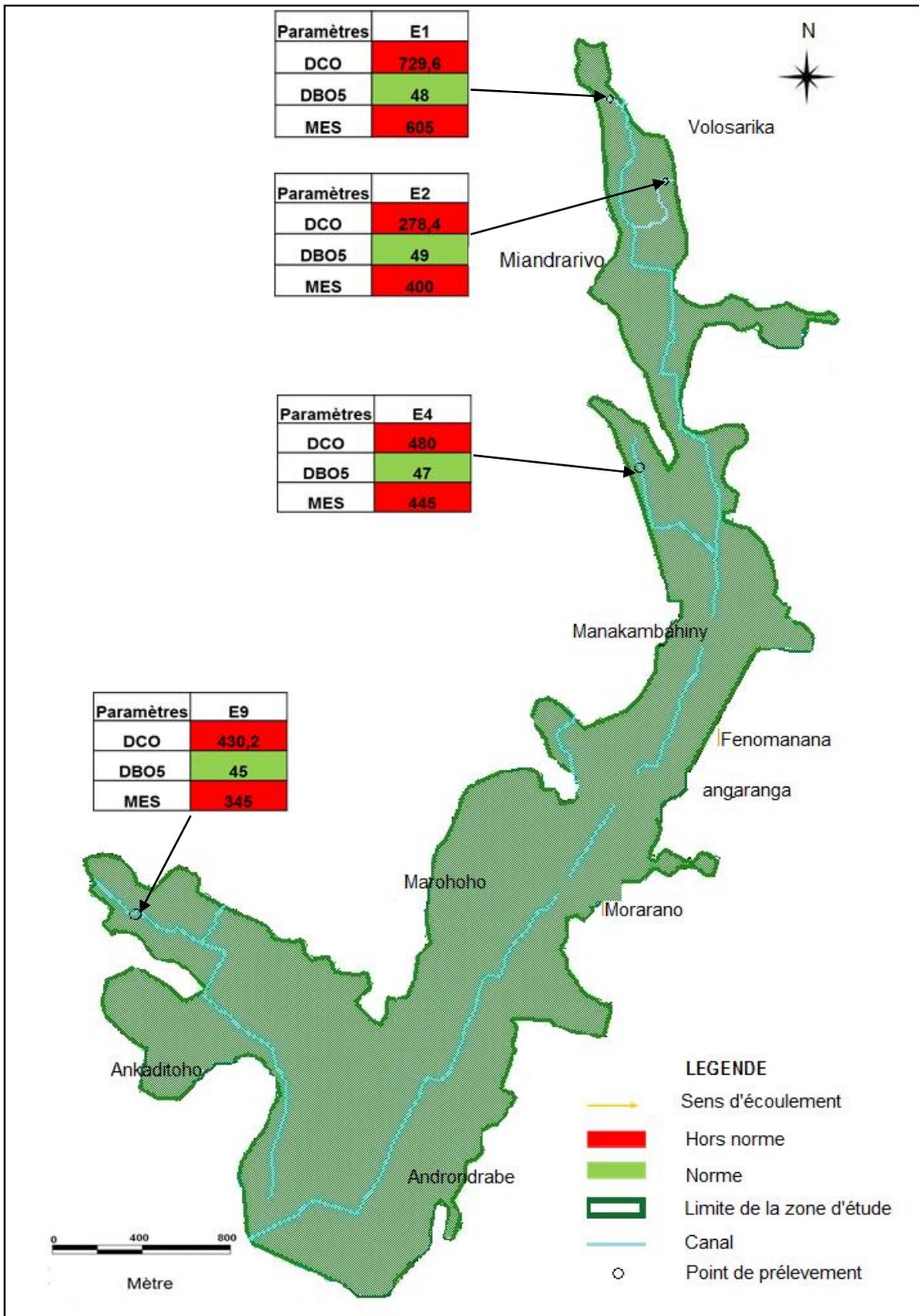


Figure 13 : Teneurs des charges nutritives dans les 4 sources d'eaux usées domestiques

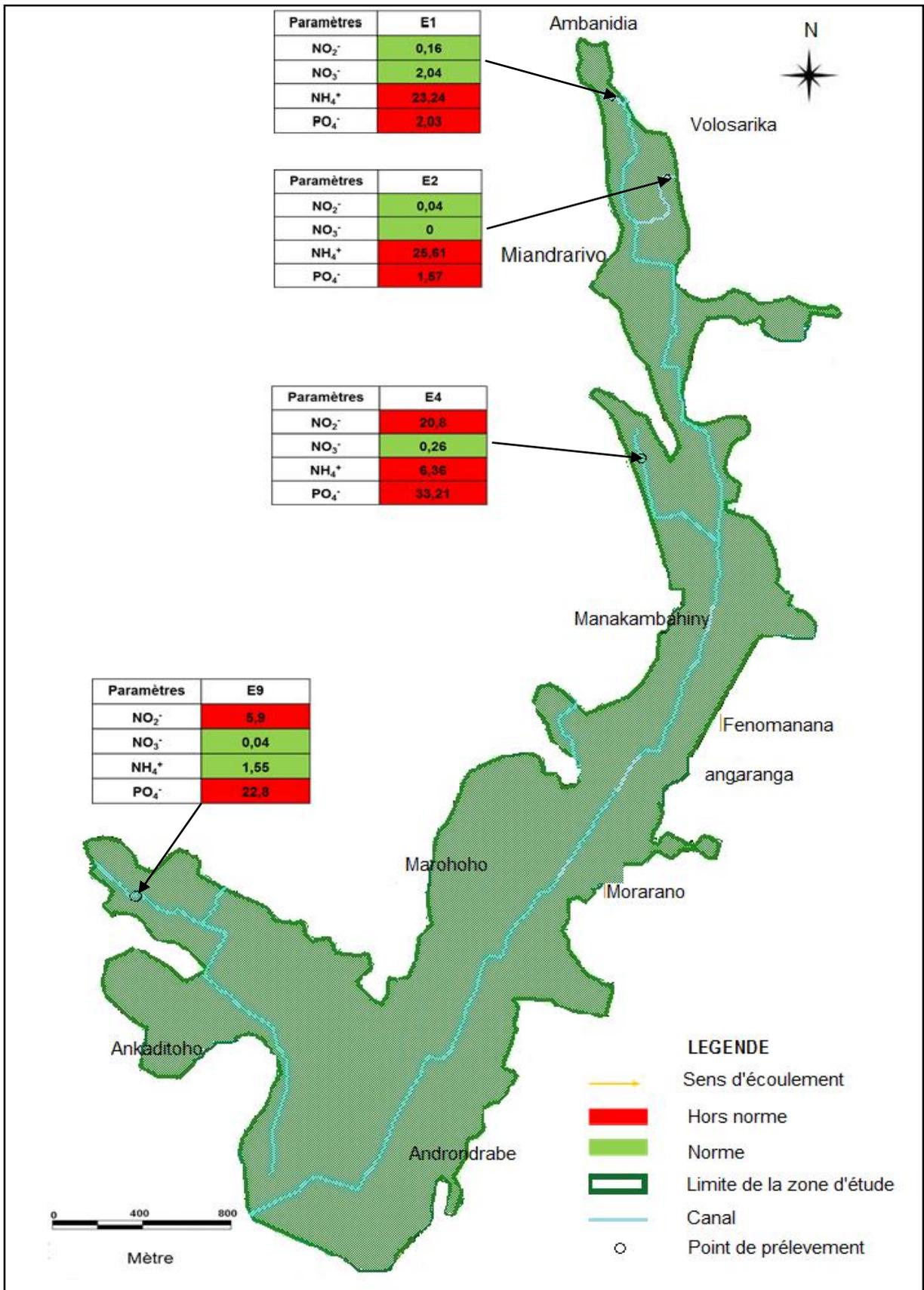
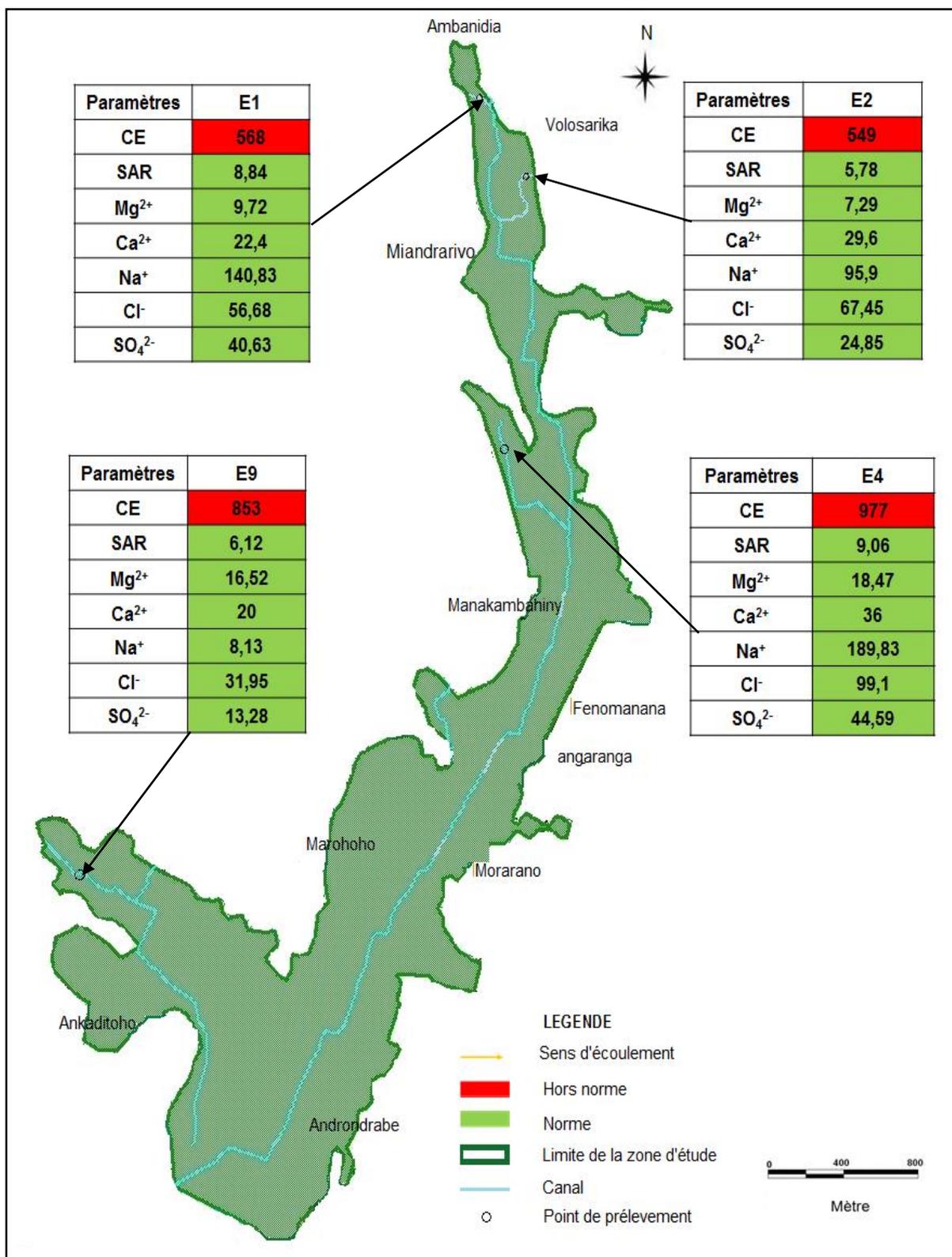


Figure 14 : Concentration des principaux ions et mesure des conductivités électriques dans les 4 sources de la zone d'étude



II. INTERET DE LA REUTILISATION DE L'EAU USEE POUR L'AGRICULTURE URBAINE

II.1. Les charges domestiques spécifiques

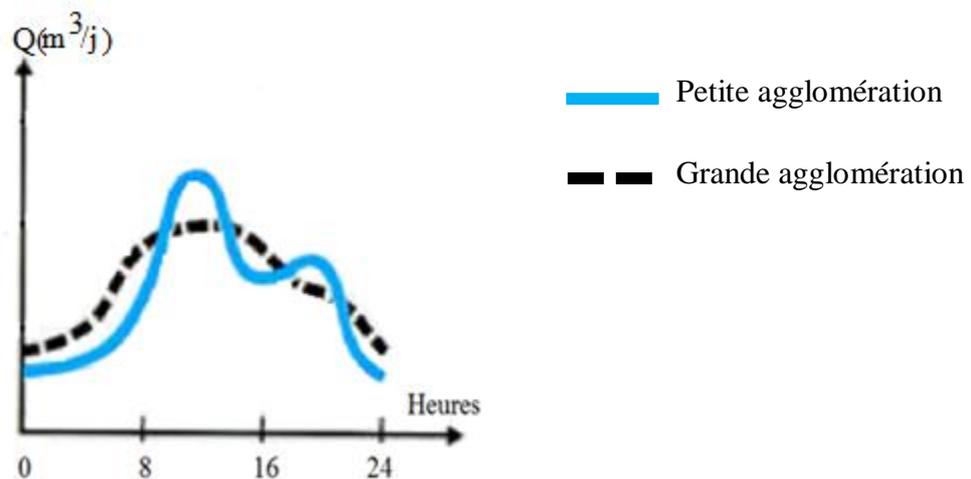
Les charges domestiques spécifiques, plus classiquement connues sous le terme d'équivalent-habitant (EH) sont les quantités de matières domestiques émises par individu et par jour. Les données bibliographiques ont montré que la tendance générale était à la prise en compte de cinq principaux critères : MES, DCO, DBO₅, phosphates, azotes.

D'après M.H. Tusseau-Vuillemin, l'équivalent habitant est la charge journalière correspondant à 60g de DBO₅ et 120g de DCO, 3g de phosphates et 12g d'azotes avec 150 L d'eaux consommées (M.H. Tusseau-Vuillemin).

II.1.1. Volume d'eaux usées domestiques provenant des quatre sources

Le volume d'eaux usées rejeté par habitant par jour va généralement croître avec la taille de l'agglomération par suite de certaines différences d'habitudes de vie et d'une plus grande activité des secteurs secondaires et tertiaires (J. Rodier, 2009).

Figure 15: Variation journalière du débit Q d'eaux usées d'une collectivité urbaine.



La mesure du débit à chaque point où l'on a fait les échantillonnages nous a permis de connaître les volumes d'eaux usées déversées dans chaque réseau d'évacuation. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le *tableau 14*.

Tableau 14 : Estimation quantitative du volume d'eaux usées domestiques dans les égouts

Point de prélèvement	E1	E2	E4	E9
Volume en m ³ /j	5788,13	983,63	601,29	5977,55

II.1.2. Estimation des charges domestiques générées par habitant

Durant la descente sur la zone d'étude, on a relevé quatre canalisations d'irrigation qui ont une charge hydraulique très importante. La connaissance de la composition des eaux usées domestiques est un paramètre essentiel pour déterminer la charge journalière. On mesure généralement les charges domestiques à la sortie du réseau d'assainissement. Elles présentent une forte variabilité. Cela résulte vraisemblablement des effets cumulés d'une transformation biochimique plus ou moins poussée des eaux usées au cours de leur acheminement dans les réseaux (différant par leur pente, leur taille, température, etc...).

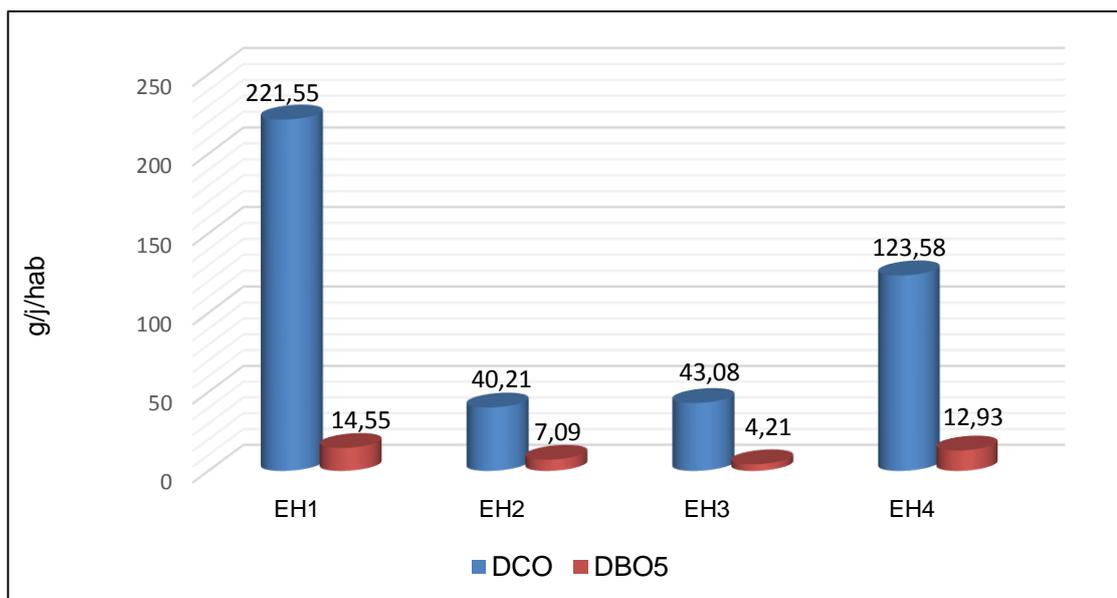
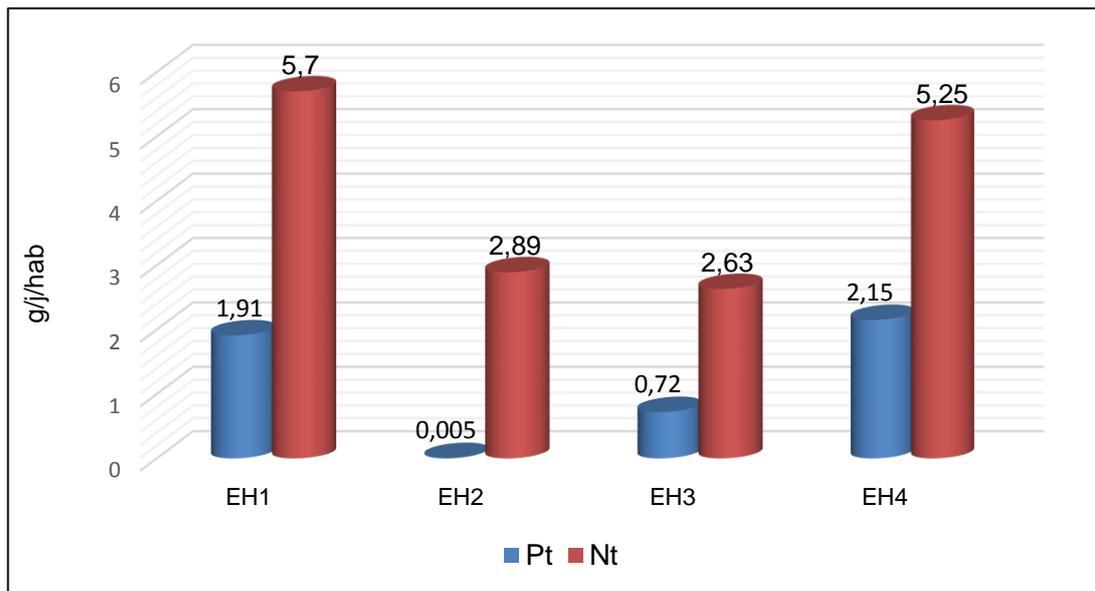
Figure 16: Charges domestiques spécifiques (DCO et DBO₅)

Figure 17: Charges domestiques spécifiques (P_t - N_t)



II.2. Avantages de l'utilisation des eaux usées à l'irrigation

II.2.1. Apport des nutriments

Notre zone d'étude est l'un des sites les plus vastes où l'on trouve des cultures maraichères surtout des cressonnières. Les superficies occupées par les cressonnières dans la CUA sont environ de 68 hectares en 2008.

L'enquête auprès des citoyens qui vivent aux alentours du site montre qu'ils génèrent environ de 40 litre/j/hab d'eaux usées. Mais la mesure du débit moyen d'eaux usées donne une valeur moyenne de 220 l/j par personne. Cette valeur est due à la forte consommation d'eau de certains habitants qui utilisent des lavoirs et sanitaires publics, et est due à l'existence de quelques eaux de sources. Ces dernières vont se mélanger avec le rejet (c'est le cas du quartier Faliarivo-Ambanidia et Ambavahadimitafo).

Les eaux usées contiennent des nutriments essentiels à la croissance des végétaux. Les plus connus sont l'azote, le potassium et le phosphore. On compte plus de 58500 habitants qui rejettent des effluents dans ce site, y compris des secteurs commerciaux et administratifs confondus. L'eau usée rejetée par chaque individu est estimée à plus de 200 litres par jour, donc ces habitants produisent approximativement 13349 m³/jour d'eaux usées. A cet effet, il y a en moyenne 490 m³ d'eaux usées domestiques disponibles pour une superficie de 1 ha.

L'évaluation du rejet montre que l'eau usée venant de Faliarivo-Ambanidia (E1) contient 108,31 kg/j d'azote (N_t) et 36,46 kg/j de phosphore ($P-P_{O_4}$) ; tandis que l'eau usée provenant du quartier Tsimbazaza-Marohoho (E9) en contient 109,32 kg/j d'azote et 44,75 kg/j de phosphore. Ces résultats montrent qu'il y a un apport supplémentaire en nutriments pour l'utilisation des rejets domestiques en agriculture.

Le bilan général nous a permis de déduire que ces eaux contiennent environ 254,9 kg d'azote par jour et 90,92 kg de phosphore par jour pour une superficie de 27 ha, c'est-à-dire 9,44 kg/j/ha d'azote et 3,36 kg/j/ha de phosphore. Pour le cas des cultures de cressons, qui ont un cycle de 45 jours environ, pendant leur croissance, la teneur en azote disponible dans les eaux usées d'irrigation est estimée à 309,6 kg/ha tandis que la teneur en phosphore est de 60,65 kg/ha.

En réalité, le bilan hydrique lié à l'évaluation quantitative de l'eau d'irrigation a généralement diminué de l'évaporation et des pertes éventuelles liées au drainage et au ruissèlement (Amadou, 1994).

II.2.2. Avantages économiques

Du point de vue économique, la réutilisation des eaux usées en irrigation contribuerait à l'amélioration de la situation économique auprès des agriculteurs. L'augmentation des récoltes est l'autre facette positive de cette réutilisation. L'eau usée est la seule source d'eaux d'irrigation pendant toutes les périodes. Un autre avantage est, cette fois, en lien avec les coûts liés à l'utilisation des engrais. En effet, l'analyse économique a démontré que cette réutilisation permettrait aux agriculteurs de réaliser des économies importantes en remplaçant l'achat d'engrais par la réutilisation des eaux usées, puisque ces dernières représentent la même valeur agronomique que celle des amendements agricoles.

Selon le (FAO, 2003), l'irrigation avec des eaux usées domestiques donne des rendements plus élevés que l'irrigation avec de l'eau douce, même si l'on utilise des engrais artificiels. À Nagpur, en Inde, par exemple, l'irrigation avec des effluents de bassin de stabilisation a permis de produire respectivement 28, 8, 47, 30 et 42 % de plus de blé, de haricots mungs (type de lentille), de riz, de pomme de terre et de coton que l'irrigation par de l'eau douce, complétée par un apport d'engrais contenant de l'azote, du phosphore et du potassium.

**Partie IV : IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES DE
L'UTILISATION DE L'EAU USEE DOMESTIQUE
SUR L'AGRICULTURE URBAINE**

I. AGRICULTURE URBAINE

L'intérêt des scientifiques pour l'agriculture dite « urbaine » est récent et croissant.

« L'agriculture urbaine est une agriculture localisée dans la ville et sa périphérie, dont les produits sont au moins partiellement destinés à la ville et pour laquelle il existe une alternative entre usage agricole et urbain non-agricole des ressources, [qui] ouvre sur des concurrences mais également des complémentarités possibles entre ces usages » (C. Aubry, 2008)

Photo 3: Cressonnières dans le vallon d'Ambanidia



Source : Auteur

II. IMPACT DES REJETS DOMESTIQUES

L'agriculture urbaine est susceptible d'entraîner diverses nuisances et pollutions, elles-mêmes génératrices des risques spécifiques pour les produits agricoles.

Le niveau de pollution par des germes fécaux au champ peut être élevé, quoique variable selon les sites de production, et au sein d'un site selon l'origine précise des eaux (C. Aubry, 2006). Cette pollution peut être accrue par les pratiques de lavage avec des eaux d'origine douteuse, utilisées par les collecteurs ou les détaillants sur les marchés. On constate cependant qu'arrivé à l'assiette, les niveaux de pollution sont très réduits. Les consommateurs lavent le cresson à l'eau propre le plus souvent et surtout le consomment cuit, à l'encontre des modes traditionnels de consommation (C. Aubry, 2010).

Photo 4 : Mode de consommation des cressons dans la vie quotidienne



Les bas-fonds intra-muros concentrent fortement des eaux usées. Celles-ci dégradent la qualité sanitaire des produits maraîchers et cressonnière au point de les rendre impropres à la consommation. Pour cela une enquête auprès des citadins qui consomment ces produits montre que ces derniers entraînent des maladies pour les consommateurs, surtout la consommation de produits agricoles crus.

Les eaux usées renferment divers organismes excrétés, y compris des agents pathogènes (à savoir des bactéries, des helminthes, des protozoaires et des virus). De nombreux agents pathogènes peuvent survivre dans le sol ou à la surface des cultures suffisamment longtemps pour pouvoir se transmettre aux humains et aux animaux. La survie de ces pathogènes dépend d'un certain nombre de facteurs, comme la composition du sol, la lumière solaire (rayonnement ultraviolet), la température, le pH, ... (OMS, 2012).

III. APPROCHE SUR LE PLAN ECONOMIQUE

L'agriculture occupe une part importante de la superficie de l'agglomération d'Antananarivo. La production agricole n'a pas des rendements élevés du fait d'un accès problématique à l'eau (irrigation, drainage) mais elle est compétitive grâce à son accès facilité aux marchés et contribue de façon non négligeable à l'approvisionnement de la capitale. Il est désormais connu que l'agriculture remplit également d'autres fonctions locales : emploi ou complément d'emploi pour les ménages, participation à l'élimination des déchets urbains.

L'enquête auprès des agriculteurs montre que l'agriculture urbaine est un moyen de réduire la pauvreté et d'améliorer la ration alimentaire des citoyens (complément de revenu)

Au point de vue économique, l'utilisation de l'eau usée domestique en agriculture augmente le rendement. L'enquête auprès des cultivateurs près d'Ambavahadimitafo, qui utilise de l'eau de source montre qu'il y a une différence entre l'utilisation de l'eau de source comme irrigation et de l'eau usée domestique. En utilisant l'eau de source, les agriculteurs utilisent beaucoup plus d'engrais NPK. L'eau de source (Eréf.) ne contient que peu de nutriments: 16mg.l⁻¹ de phosphates, 0,23mg.l⁻¹ d'ammonium assimilable et pauvre en matière organique 1,8mg.l⁻¹.

Dans la commune urbaine d'Antananarivo, la production de cresson se situerait entre 20.000 t et 40.000 t (pour tenir compte du fait qu'une partie de la production est orientée directement par les cressiculteurs vers les marchés extérieurs de la capitale sans transiter par les marchés de gros). (M.H. Dabat, 2006)

Les enquêtes effectuées (Juin-Juillet 2014) auprès des agriculteurs montrent que l'utilisation des eaux usées domestiques en agriculture donne des avantages pour eux. Le rendement est de 27,4 t/ha pour les cultures humides : cresson, des légumes,...

On estime qu'un agriculteur gagne une somme de 120000 Ar environ pour une parcelle de cresson de 90m² par saison. Par contre, l'enquête auprès des consommateurs des produits venant de cette zone d'étude prouve que le prix de ces légumes est très bas à cause de leurs mauvaises qualités surtout les cressons (M. Gae, 2010).

IV. APPROVISIONNEMENT SUR LES MARCHES LOCAUX

Dans la CUA, le maraîchage local a une part importante dans l'approvisionnement de la ville (exclusive pour des produits périssables comme les cressons, les brèdes,...), avec certaines spécialisations de sites : leur complémentarité de production dans le temps permet un étalement de la commercialisation des légumes et un lissage des prix de certains produits.

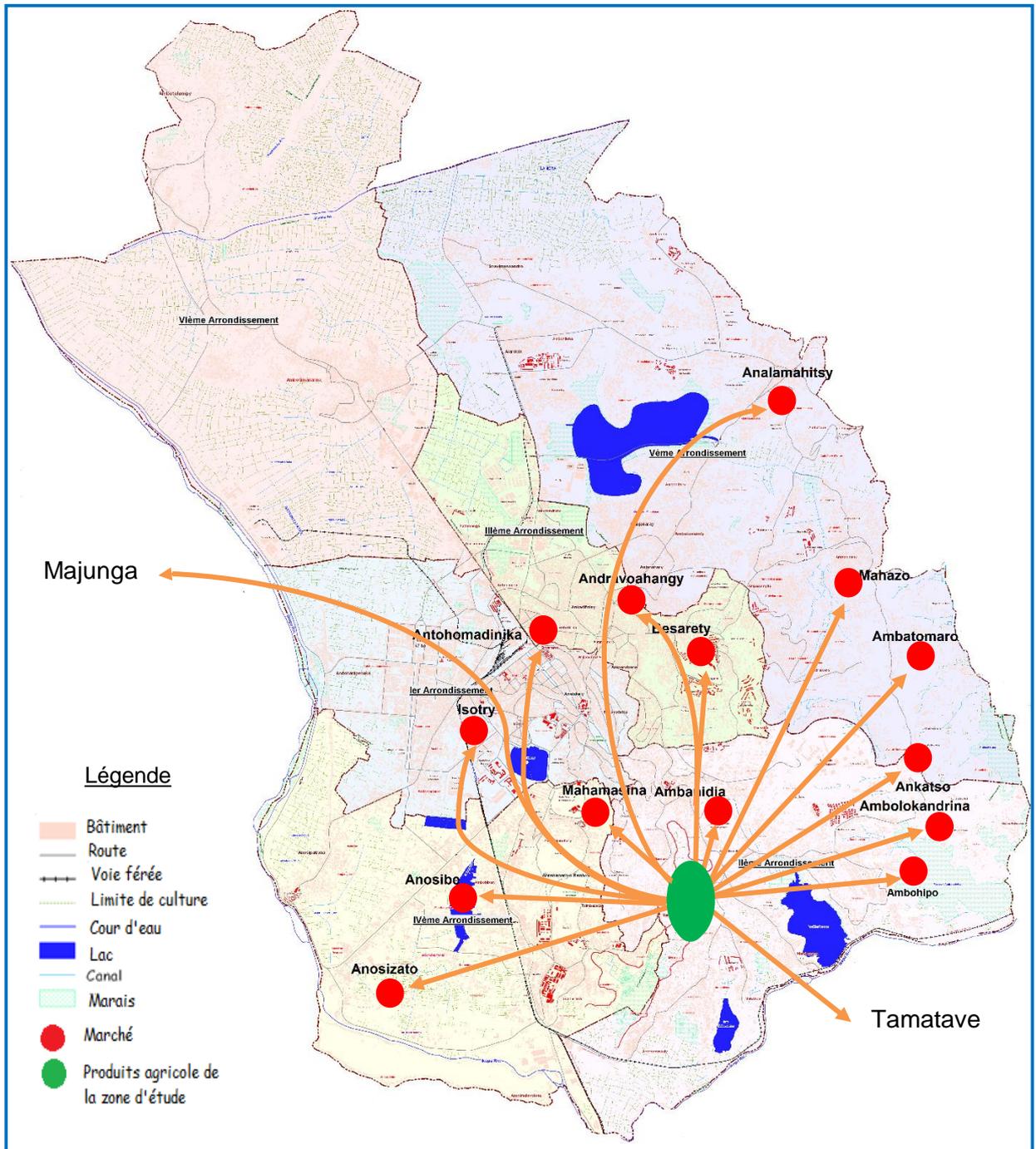
En outre, les avantages de la réutilisation d'eaux usées sont principalement d'ordre économique pour les producteurs, car cette étude recense une augmentation des rendements et des coûts de production diminués en épargnant des fertilisants.

L'enquête socio-économique auprès des agriculteurs montre que l'agriculture dans les bas-fonds intra-muros de la CUA présente une importance économique pour les agriculteurs. Mais il y a plusieurs facteurs influençant à cet intérêt économique :

- la prolifération de l'habitat sur les pentes, sans accompagnement d'infrastructures d'écoulement de l'eau, se répercute directement sur les systèmes agricoles,
- les produits d'érosion arrivant sur les parcelles de bas-fonds les ensablent et changent la nature des sols,
- pour le cas de la production cressonnière, le premier facteur influençant à cette production est la facilité d'accès à l'eau.

La *figure 18* présente le circuit des ventes des produits maraîchers et cressonnières venant de la zone d'étude.

Figure 18: Circuits de vente des produits issus de la zone d'étude



CONCLUSION

La Commune Urbaine d'Antananarivo est aujourd'hui confrontée à des problèmes aigus d'inondation des bas-fonds. Même en saison sèche, tous les rejets (domestiques, industriels,...) sont déversés dans les zones basses qui hébergent divers types d'agriculture.

Les eaux usées domestiques issus des bassins versants du vallon d'Ambanidia jusqu'à Ankaditoho-Marohoho irrigue un vaste champ de culture surtout les cressonnières.

Les analyses physico-chimique montre que les eaux d'irrigation ne respectent ni la norme malagasy ni les normes des Nation Unies :

- la conductivité électrique varie de $250\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $977\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,
- la DBO_5 est de l'ordre de $50\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, tandis que la DCO varie de $279\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ à $730\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$,
- les matières en suspension oscillent de $400\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ à $60\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

Par contre, on constate que l'eau usée domestique apport de compléments de nutriments pour les cultures. On estime que les quatre sources d'eaux usées domestiques (E1, E2, E4 et E9) apportent environ $9,44\text{ kg/j/ha}$ d'azote et $3,36\text{ kg/j/ha}$ de phosphore.

Du point de vue économique, un agriculteur peut encaisser une somme de 1.000.000 Ar environ pendant une année pour une parcelle de cresson de 90m^2 .

Cependant, les impacts négatifs se manifestent aussi bien sur le plan sanitaire que sur le plan environnemental.

Sur le plan environnemental, il s'agit de contamination de la nappe en nitrate et en germes témoins de contamination fécale, mais il y a aussi un constat de salinisation des sols et de diminution de son pouvoir de rétention de l'azote et autres éléments nutritifs.

Sur le plan sanitaire, il s'agit d'une contamination bactérienne des zones de production via des rejets domestiques. Les agents pathogènes se propagent dans les produits et peuvent être transmis à l'homme par consommation, et conduit à des maladies infectieuses surtout chez les consommateurs des produits crus.

BIBLIOGRAPHIE

- Amadou M.** (1994). *"Analyse et modelisation de l'evaporation-transpiration d'une culture de mil en region aride Saheliene"*.Thèse de Doctorat de l' Universite Paris XI Orsay.208p.
- Aubry C. et al.** (2006). *"Agriculture urbaine et gestion durable de l'espace d'Antananarivo"*. Journal de l'Economie Rural. 18p
- Aubry C. et al.** (2008). *"L'agriculture à Antananarivo (Madagascar): une approche interdisciplinaire"*. Nature Sciences Sociétés.17p
- Aubry C., Dabat M. H.** (2010). *"Fonction alimentaire de l'agriculture urbaine au Nord et au Sud"*. Montpellier France. 14p
- Belgityti D.** (2009). *"Caracterisation physico-chimique des eaux usées d'abatoir en vue de la mise en oeuvre d'un traitement adequat: cas de Keneitra Maroc"*. Journal de l'Afrique Science. 18p
- CIRAD, GRET.** (2002). *"Méméto de l'agronomie"*. 1691p .
- Degrémont.** (2005). *"Méméto technique de l'eau"*. 1718p
- FAO.** (2003). *"L'irrigation avec des eaux usées traitées"*. Site web: www.fao.org consulté le 15 mars 2015
- Gae M. et al.** (2010). *"Manuels des bonne pratiques de l'utilisation saine des eaux usées dans l'agriculture urbaine"*. Dakar SENEGAL (FAO).131p
- Hogg et al.** (2009). *"L'irrigation par les effluents - perspective de la Saskatchewan"*.17p
- Keddal H. et al.** (2008). *"Impacts de l'intensification agricole sur la qualite des eaux de surface et des eaux souteraines"*.17p
- Ministere de l'Environnement.** (2003). *"Classification des eaux de surface et reglementation des rejets d'effluents liquides"*. Madagascar
- OMS.** (2012). *"Utilisation des eax usées en agriculture"*. 254p
- OMS.** (1989). *"La fixation de norme en matière en environnement"*. Genève.110 p
- Ramahomanana A.** (2008). *"Caracteristiques physico-chimiques des sols de marais dans la Commune Urbaine d'Antananarivo"*. Memoire de DEA en Chimie de l'environnement . 117p

Richert A. (2011). *"Conseils pratiques pour l'utilisation de l'urine en production agricole"*. Stockholm Environment Institute. 73p.

Rodier J. et al (2009). *"L'analyse de l'eau"*. 9^èmé édition .Dunod. 1600p

Tusseau-Vuillemin M.H. et al.(2007) *"Charges domestiques spécifiques et rejets de station d'épuration"*. Site web: www.sisyphes.upm.fr/piren/?q=wefm_send/218.18p

UPDR. (2003). *Monographie de la region d'Antananarivo.*

ANNEXES

Tableau a : Suivi horaire du pH et du TDS [mg.l⁻¹] des rejets durant la saison de pluie (Février 2015)

	E1		E2		E4	
Horaires	pH	TDS	pH	TDS	pH	TDS
7	6,74	4,10	6,70	3,80	6,52	3,20
8	6,76	3,80	6,69	4,10	6,68	3,10
9	6,77	4,50	6,74	4,20	6,65	3,30
10	6,72	5,70	6,72	4,50	6,64	3,70
11	6,74	5,60	6,73	4,70	6,27	4,20
12	6,68	6,30	6,71	4,80	6,30	4,10
13	6,71	5,80	6,68	4,30	6,41	4,00
14	6,68	5,20	6,65	4,30	6,43	3,90
15	6,70	4,90	6,61	4,20	6,39	4,20
16	6,68	4,80	6,63	4,10	6,65	3,80
17	6,62	4,70	6,68	4,30	6,65	3,90
Ecart-type	±0,03	±0,62	±0,03	±0,20	±0,13	±0,32

Tableau b : Facteurs de conversion des principaux nutriments.

Pour convertir	En	multiplier par
K	K ₂ O	1,20
P	P ₂ O ₅	2 ,29
NO₃	N	4 ,42
NH₄	N	1,28
NO₂	N	3,28

Tableau c: Les variétés des légumes recensées dans la zone d'étude

CLASSE	NOM VERNACULAIRE	NOM SCIENTIFIQUE
Feuille	Ti-sam	<i>Brassica sinensis L.</i>
Feuille	Pe-tsai	<i>Brassica pekinensis</i>
Feuille	Chou pommé	<i>Brassica oleracea L.var. catitata</i>
Feuille	Poireau - Oignon vert	<i>Allium porreum</i>
Feuille	Chou rouge	<i>Brassica oleracea L.var. rubra</i>
Feuille	Céleri	<i>Apium graveolens L.</i>
Feuille	Cresson	<i>Nasturtium officinale</i>
Feuille	Persil	<i>Petroselinum crispum</i>
Feuille	Laitue	<i>Lactuca sativa L./ Cichorium endiva L</i>
Feuille	Chou- fleur	<i>Brassica oleracea L.var. botrytis DC</i>
Fruit	Angivy	<i>Solanum incanum L.</i>
Fruit	Courgette	<i>Cucurbita pepo L.</i>

Tableau d : Variétés de cressons dans la zone d'étude

VARIETES	RACINES	TIGES	FEUILLES
Antsirabe	Peu nombreuses	Vides à section polyédrique	5 folioles vert pâle
Malamakely	Peu nombreuses	Vides à section polyédrique	3 ou 5 folioles vert pâle
Zanatany	Nombreuses	Souples Pleines à Section circulaire	3 folioles Vert foncé

Tableau e : Résultats de quelques enquêtes auprès des agriculteurs.

N°	Type de culture		Utilisation des produits chimiques			Nombre de saison		Recette annuelle			
	Superficie m ²	Cresson	Maraîchère	Pesticide	Engrais	Autres	Sèche	Humide	Quantité annuelle des légumes (Kg)	Crédité	Débité
1	350	Oui		Malathion	NPK		5	4	11355	270000	3505000
2	450	Oui	oui	Malathion	NPK		5	3	10920	564000	5800000
3	2500	Oui	oui	Malathion	NPK	-	5	3	44000	1480000	28750000
4	520	Oui	oui	Malathion	NPK	-	5	3	9700	256000	61000000
5	1560	Oui	oui	Malathion	NPK	-	5	3	34800	525000	7500000
6	3840	Oui	riz	Malathion	NPK	-	4	1	76800	1200000	15600000
7	250		oui		NPK	-	6	4	4500	60000	1150000
8	600	oui	oui	Malathion	NPK	-	4	2	16000	310000	3300000
9	100		oui	DDT	NPK	-	5	4		60000	1500000
10	320	oui	oui	Malathion	NPK	-	5	3	12000	30000	190000
11	800	oui		Malathion	NPK		4	3	23000	392000	4800000
12	120		oui	Malathion		-	3	3	2300	36000	506000
13	250		oui	DDT		-			9000	120000	980 000
14	470	oui	oui	Malathion	NPK	fumier	5	3	11 700	140000	3400000
15	180	oui		Malathion	NPK	-	4	3	4600	70000	950000

Tableau f : Analyse des paramètres physiques

Paramètres	pH	CE [mg/l]	Turbidité [NTU]	MES [mg/l]
Appareils et Méthodes	Lecture directe - CONSORT P707	Lecture directe sur un conductimètre	Lecture directe sur un turbidimètre	Filtre sous vide Séchage à 105°C durant 2heures Pesage

MATIERES ORGANIQUES

L'opération consiste à mesurer, en milieu acide ou alcalin, la quantité d'oxygène enlevée au permanganate de potassium par les matières grasses d'origine animale ou végétale dans l'eau.

DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGENE

Oxydation des matières organiques et matières minérales contenues dans un échantillon, par un excès de bichromate de potassium, en milieu acide et en ébullition, sous reflux pendant deux heures, en présence de sulfate mercurique et de sulfates d'argent.

DEMANDE BIOCHIMIQUE EN OXYGENE

L'échantillon mesuré est placé dans un flacon brun. Les flacons contenant les échantillons d'eau sont placés et connectés par un manomètre.

Après cinq jours, on lira directement les résultats et ceci donne la valeur de la DBO₅

<i>Gamme de DBO</i>	<i>Volume d'échantillon nécessaire</i>	<i>Echelle</i>
0 – 35	420	0 – 35
0 – 70	355	0 – 70
0 – 350	160	0 – 350
0 – 700	95	0 – 700

DOSAGE DES CHLORURES

La méthode utilisée est la méthode de Mohr, en présence de chromate de potassium. Les chlorures sont dosés par du nitrate d'argent. On obtient un précipité de chlorure d'argent AgCl₂. La fin de la réaction est repérée par l'apparition de la teinte rouge brique caractéristique du chromate d'argent.

DOSAGE DU CALCIUM

Le calcium est dosé par la méthode au complexon III. L'indicateur utilisé est le purpurate d'ammonium ou le murexide. La zone de virage est atteinte lorsqu'on observe une coloration violette.

DOSAGE DE L'AMMONIUM

Le dosage colorimétrique des ions NH_4^+ s'effectue en utilisant le réactif de Nessler (iodo-mercure de potassium alcalin) en présence d'ion ammonium. Effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 425 nm

DOSAGE DES NITRATES

Les nitrates forment avec l'acide sulfosalicylique un dérivé qui, en milieu alcalin, donne une coloration jaune stable. Effectuer les lectures sur spectromètre à longueur d'onde 415 nm

DOSAGE DES NITRITES

L'acide sulfoniques en milieu chlorhydrique, en présence d'un ammonium et phénol, forme les ions NO_2^- un complexe coloré en jaune dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en nitrite. On effectue la lecture à la spectroscopie à longueur d'onde 435 nm

DOSAGE DES SULFATES

Les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Le précipité obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de tween 20 ou de polyvinylpyrrolidone. Des suspensions homogènes sont mesurées au spectromètre de longueur d'onde 650 nm.

Nom : ANDRIANIRINA

Prénom : Setraniaina

Adresse : Bloc 21 P 04 CU Ankatso II Antananarivo 101

Tél. : +261330372706 Email : andrysetra@gmail.com

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE) Ampasapito Antananarivo 101

Titre : *Caractérisation physico-chimique des eaux usées domestiques pour l'irrigation dans une zone intra-muros de la commune urbaine d'Antananarivo*

RESUME

Cette étude a été effectuée dans une zone intra-muros de la Commune Urbaine d'Antananarivo. Les résultats d'analyse physico-chimique des eaux usées domestiques pour irriguer les cultures dans le site montrent que ces eaux sont très polluées. La turbidité des rejets est très élevée (elle varie de 127 NTU à 421 NTU) et ne respecte pas les normes des rejets destinés à l'irrigation (<25 NTU). Le coefficient de dégradabilité « k » élevé ($3,45 \leq k \leq 8,63$) prouve que les rejets contiennent des matières organiques non biodégradables. En se référant à la valeur de la conductivité, les eaux usées domestiques analysées sont généralement classées à salinité moyenne.

L'utilisation des eaux usées domestiques en agriculture est bénéfique pour les cultures (apport des éléments nutritifs : 9,44 kg/j/ha d'azote et 3,36 kg/j/ha de phosphore).

Cependant, les impacts négatifs se manifestent essentiellement sur la qualité des produits.

Mots clés : eau usée domestique, eau d'irrigation, agriculture urbaine, pollution, vallon d'Ambanidia

ABSTRACT

This study was carried in an intramural area of the Urban Council of Antananarivo. The results of physico-chemical analysis of domestic wastewater used to irrigate the crops show that this water is very polluted. The water has high levels of turbidity (it varies from 127 NTU to 421 NTU) and doesn't meet the recommended standard of wastewater used for irrigation (<25 NTU). The high coefficient of degradability "k" ($3,45 \leq k \leq 8,63$) indicates high non-biodegradable organic matter content. Referring to the value of the conductivity, the domestic sewages analyzed are generally classified medium salinity.

The use of domestic wastewater on agriculture is beneficial for crops (intake of nutrients: 9,44 kg / j / ha of nitrogen and 3,36 kg / j / ha of phosphorus).

However, the negative impacts mainly manifest on the quality of the product.

Keywords: domestic wastewater, irrigation water, urban agriculture, pollution, valley of Ambanidia

Encadreur : Dr RANDRIANANTOANDRO Tahina