



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE TOLIARA
FACULTÉ DES SCIENCES



**Mémoire de fin d'études pour l'obtention du
Diplôme d'Études Approfondies en Biodiversité et Environnement
Option : Biologie Végétale**

La faisabilité de la phytoépuration des eaux usées dans la ville de Toliara



Par :

RAJAONARIVELO Fanjatiana Justoberthe

Soutenu le 31 octobre 2013

Président du jury : Professeur Alphonse DINA
Examineur : Professeur Lily-Arison RENE DE ROLAND
Rapporteur : Professeur Felicité REJO-FIENENA

9ème promotion

Année universitaire 2011-2012

Remerciements

Mes reconnaissances vont à l'encontre des personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude, en particulier :

- *Professeur DINA Alphonse, qui a bien voulu accorder l'honneur de présider le jury de ma soutenance.*
- *Professeur REJO-FIENENA Félicitée, Directeur de la Formation Doctorale en Biodiversité et Environnement de l'Université de Toliara, qui m'a encadré tout au long de ce travail. Ses conseils et ses directives comptent beaucoup pour moi.*
- *Professeur RENE DE ROLAND Lily-Arison, qui a accepté d'examiner ce travail.*
- *Docteur Serge TOSTAIN, représentant du FORMAD, qui a financé cette étude. Ses encadrements et ses conseils tout au long de ce travail m'ont été chers.*
- *Docteur LEZO Hugues, Doyen de la Faculté des Sciences et les enseignants à la Faculté des Sciences de l'Université de Toliara.*
- *Mr Bosoria, agent voyer de la Commune Urbaine de Toliara qui m'a aidé pour le travail sur le terrain.*
- *Aux personnels administratifs la Commune Urbaine de Toliara*
- *Mr RAKOTONDRAZAFY Léon Jules, Enseignant au Collège Sacre Cœur Tsianaloka, résidant à Besakoa, qui a accepté de collaborer avec nous durant cette étude.*
- *Les collègues et les étudiants de ma promotion pour leurs encouragements.*

Je remercie mes parents pour leur effort tout au long de mes études. Que cet ouvrage soit la récompense de tous leurs sacrifices et le témoignage de toute ma gratitude et de mon entière affection.

J'adresse aussi mes reconnaissances à mon mari, mes deux filles Monsoleil et Océane. Leurs soutiens matériel et moral me sont inestimables.

Encore merci !

Table des matières

INTRODUCTION.....	9
1. PROBLÉMATIQUE.....	9
2. CHOIX DU SUJET.....	10
3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	10
3. 1. Objectif principal.....	10
3. 2. Objectifs spécifiques.....	10
4. HYPOTHÈSES À VÉRIFIER.....	11
I. LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	12
I. 1 - CLIMATOLOGIE.....	13
I. 1. 1. Pluviométrie.....	13
I. 1. 2 - Température.....	14
I. 2 - DÉMOGRAPHIE.....	14
I. 3 - INFRASTRUCTURES DE BASE.....	14
I. 4 - STRUCTURES DE GOUVERNANCE LOCALE.....	14
I. 5 - PLAN D'URBANISME DE LA VILLE.....	15
I. 6 - LES SITES D'ÉTUDE.....	15
II. MÉTHODOLOGIE.....	16
II. 1 - LES TRAITEMENTS DES EAUX USÉES PAR LA PHYTOÉPURATION.....	16
II. 1. 1 - Généralités.....	16
II. 1. 2 - Les types de lagunage.....	16
II. 1. 2. 1- Le lagunage à microphytes.....	16
II. 1. 2. 2 - Le lagunage à macrophytes.....	16
II. 1. 3 - Processus de fonctionnement du lagunage.....	17
II. 1. 4 - Exemple de processus d'élimination des polluants.....	18
II. 1. 4. 1- Elimination de l'azote.....	18
II. 1. 4. 2 - Elimination du phosphore.....	19
II. 1. 4. 3 - Elimination de la pollution bactériologique.....	19
II. 1. 4. 4 - Elimination des boues d'épuration.....	20
II. 1. 5 - Les étapes et procédés de traitement des eaux usées.....	20
II.1. 5. 1 - Les prétraitements.....	20
II. 1. 5. 2 - Les traitements.....	20
II. 1. 6 - Conception d'une station de phytoépuration.....	21
II. 1. 6. 1 - Le temps de rétention de l'eau dans le bassin.....	21
II. 1. 6. 2 - Nombre du bassin.....	21
II. 1. 6. 3 - Le dimensionnement du bassin.....	21
II. 1. 6. 4 - Les contrôles de la station d'épuration.....	22
II. 1. 6. 5- Exemple de contrôle de station d'épuration des pays développés.....	22
II. 1. 7 - Le traitement des eaux pluviales.....	23
II. 2 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	23
II. 3 - ENQUÊTES.....	23
II. 4 - ETUDE SUR LE TERRAIN.....	24
II. 4. 1 - Inventaires des plantes épuratrices des eaux usées à Toliara.....	24
II. 4. 2 - Critères de choix des plantes épuratrices.....	24
II. 4. 3 - Expérience d'épuration des eaux usées.....	24

II. 4. 3. 1 - Les paramètres étudiés	24
II. 4. 3. 2 - La température	24
II. 4. 3. 3 - La conductivité.....	25
II. 4. 3. 4 - Le pH (potentiel Hydrogène)	25
II. 4. 3. 5 - L'oxygène dissous.....	25
II. 4. 3. 6 - Appareil de mesure des paramètres étudiés	26
II. 4. 4 - Expériences dans un bassin.....	26
II. 4. 4. 1 - Culture de la jacinthe d'eau dans le bassin	26
II. 4. 4. 2- Suivi de la régénération de la jacinthe d'eau dans le bassin	27
II. 4. 4. 3 - Culture expérimentale de la jacinthe d'eau.....	27
II. 4. 5 - Evaluation de la biomasse disponible de la jacinthe d'eau à Toliara.....	28
III. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS.....	29
III. 1 – LE CONSTAT : ENQUÊTES ET OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN	29
III. 1. 1 - Type d'habitats et des lieux d'aisance dans la ville de Toliara	29
III. 1. 2 - Approvisionnement en eau de la ville de Toliara.....	32
III. 1. 3 - Estimation de la consommation d'eau de la ville de Toliara.....	33
III. 1. 4 - Estimation du débit des eaux usées	34
III. 1. 5 - L'évacuation des eaux usées domestiques dans la ville de Toliara.....	34
III. 1. 6 – Autres évacuations des eaux usées à Toliara.....	36
III. 1. 6. 1- Les hôtels et restaurants.....	36
III. 1. 6. 2 - Les sociétés à caractère industriel à Toliara	38
III. 1. 6. 2. 1- Les sociétés œuvrant dans les produits halieutiques	38
III. 1. 6. 2. 2 - La société Indosuma (huilerie, savonnerie).....	41
III. 1. 6. 3 - L'hôpital.....	42
III. 1. 6. 4 - Les causes des problèmes de gestion des eaux usées à Toliara	43
III. 1. 6. 5 - Les conséquences de l'insuffisance de gestion des eaux usées	44
III. 2 - ETUDE DE LA PHYTOÉPURATION À TOLIARA	45
III. 2. 1- Aperçus de la phytoépuration	45
III. 2. 1. 1- Aperçus de la phytoépuration dans le monde	45
III. 2. 1. 2- Aperçus de la phytoépuration à Madagascar	45
III. 2. 2- Les plantes épuratrices à Toliara.....	46
III. 2. 3 - Choix des plantes épuratrices pour l'étude.....	47
III. 2. 4 - Description des plantes épuratrices choisies	48
III. 2. 4. 1 - La jacinthe d'eau	48
III. 2. 4. 1. 1 - Origine et description botanique.....	48
III. 2. 4. 1. 2 - Les modes de reproduction.....	49
III. 2. 4. 2 - <i>Moringa oleifera</i>	49
III. 2. 5 - Test d'efficacité de traitement des eaux usées avec les plantes choisies	51
III. 2. 5. 1 - Les paramètres des eaux usées dans les sites d'étude	51
III. 2. 5. 2 - Températures de l'eau dans le bassin couvert de la jacinthe d'eau	52
III. 2. 5. 3 - Qualité des eaux usées avec jacinthe d'eau et tige de moringa.....	52
III. 2. 5. 4 - Mesure de la densité et de la biomasse de la jacinthe d'eau au bord de la mer	54
III. 2. 5. 5 - Suivi de la croissance de la jacinthe d'eau suivant les saisons.....	54
III. 3 - DISCUSSIONS	56
III. 3. 1- traitement des eaux usées par la jacinthe d'eau	56
III. 3. 2 - Traitements des eaux usées par le moringa	57
III. 3. 2. 1 - Utilisation des graines	57
III. 3. 2. 1. 1- Avantage de l'utilisation des graines dans le traitement des eaux	

usées.....	57
III. 3. 2. 1. 2 - Inconvénients de l'utilisation des graines dans le traitement des eaux usées	57
III. 3. 2. 2 - Utilisation de la tige.....	58
III. 3. 2. 2. 1 - Avantages de l'utilisation de la tige.....	58
III. 3. 2. 2. 2 - Inconvénients de l'utilisation de la tige de moringa.....	59
III. 3. 3 - Etude d'une conception d'une station d'épuration à Toliara	59
III. 3. 3. 1 - Types du lagunage choisi.....	59
III. 3. 3. 2 - Choix du site à épurer et dimensionnement des bassins.....	59
III. 3. 3. 3 - Lieu de prélèvement des plantes épuratrices	61
III. 3. 3. 4 - Schéma de la station d'épuration proposée	62
III. 3. 3. 5 - Coût d'installation des stations.....	62
III. 3. 4 - Avantages du choix des plantes	63
III. 3. 4. 1 - La jacinthe d'eau	63
III. 3. 4. 2 - <i>Moringa oleifera</i> ou Ananambo	65
III. 3. 5 - Importance de la mise en place d'une station d'épuration	66
III. 3. 5. 1 - Avantages environnementaux	67
III. 3. 5. 2 - Avantages socio-économiques	67
CONCLUSION	68
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	71

Sigles

ANDEA : Autorité Nationale de l'Eau et de l'Assainissement
BMH : Bureau Municipal d'Hygiène
COPEFRITO : Compagnie de Pêche Frigorifique de Toliara
DBO5 : Demande Biochimique en Oxygène mesurée après cinq jours
DCO: Demande Chimique en Oxygène
ICAM: Intoxication par Consommation d'Animaux Marins
IH.SM: Institut Halieutique et des Sciences Marines
INDOSUMA: Industrie Oléagineuse du Sud de Madagascar
JIRAMA: Jiro sy Rano Malagasy
MAP: Madagascar Action Plan
MES: Matières en suspension
NORAD : Norway Agency Development
ONE : Office National de l'Environnement
ONG : Organisme Non Gouvernemental
PDA : Plan Directeur d'Assainissement
pH : potentiel Hydrogène
PUDi : Plan d'Urbanisme Directeur

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des eaux d'après leur pH.....	17
Tableau 2 : Nombre et pourcentage des ménages suivant leur consommation journalière en eau à Toliara parmi un échantillonnage de 88 ménages	25
Tableau 3 : Evacuation des eaux usées de quelques hôtels et restaurant de la ville de Toliara ...	29
Tableau 4 : Mesures des paramètres étudiés dans les sites d'étude	43
Tableau 5 : Nombre de pieds par m ² , la biomasse de la jacinthe d'eau au bord de la mer et le poids frais moyen d'un pied	46
Tableau 6 : Régénération expérimentale de la jacinthe d'eau dans le bassin pendant les trois saisons (par quinzaine). Température moyenne	47
Tableau 7 : Simulation de dimensionnement d'une station de lagunage par fokontany de la ville de Toliara	52
Tableau 8 : Coût estimatif d'une installation d'une station d'épuration à Tsimenatse II	55
Tableau 9 : Comparaison des compositions nutritionnelles de la spiruline en poudre et des feuilles de <i>Moringa oleifera</i> en poudre pour quelques éléments (pour 100 grammes de poudre).....	58

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la ville de Toliara.....	4
Figure 2 : Carte de la commune urbaine de Toliara de Toliara.....	5
Figure 3 : Répartition annuelle des pluies dans une année dans la ville de Toliara.....	6
Figure 4 : Principes de l'épuration dans un bassin à macrophytes flottants.....	10
Figure 5 : Photo du kit multiparamètre modèle Multi 340i.....	18
Figures 6 : Bassin de lagunage à Besakoa avant (5a) et après (5b) aménagement et plantation.....	19
Figures 7 : Méthode utilisée pour étudier l'épuration par les jacinthes avec de l'eau grise (6a) et hors du bassin (6b).....	20
Figure 8 : Types d'habitats par arrondissement.....	21
Figure 9 : Types de lieux d'aisance dans six arrondissements	22
Figure 10 : Pompe « japy » à Tsenengea.....	24
Figure 11 : Un type de gaspillage de l'eau.....	26
Figures 12 : Travaux de construction d'un système d'évacuation des eaux pluviales près du CEDRATOM-Université de Toliara au-dessus de l'Alliance française.....	27
Figure 13 : Tuyaux d'évacuation d'eaux usées d'un hôtel au bord de la mer.....	28
Figure 14 : Consommation d'eau du restaurant Nandih.....	29
Figure 15 : Consommation d'eau de l'hôtel Mihaja Bis.....	29
Figure 16 : Consommation d'eau de l'hotel Analamanga.....	30
Figures 17 : 17a : Emplacement de la COPEFRITO dans la ville de Toliara. 17b : Emplacement de la société MUREX International dans la ville de Toliara.....	31
Figure 18 : Système d'évacuation des eaux usées de la Copefrito.....	32
Figure 19 : Tuyau d'évacuation d'eau usée en mer de la Copefrito.....	32
Figure 20 : Pompage de l'eau usée de la MUREX pour transport à Ankoronga.....	33
Figure 21 : Emplacement de l'INDOSUMA à Toliara.....	34
Figure 22 : un canal d'évacuation à Tsimenatse	35
Figure 23 : Des ordures non ramassées dans le centre de Toliara.....	35
Figure 24 : <i>Colocasia esculenta</i>	38
Figure 25 : <i>Typha angustifolia</i>	38
Figure 26 : <i>Cyperus alternifolius</i>	38
Figure 27 : <i>Eichhornia crassipes</i>	38
Figure 28 : <i>Nymphaea alba</i>	38
Figure 29 : <i>Moringa oleifera</i>	38
Figure 30 : <i>M. hildebrandtii</i>	38
Figure 31 : <i>M. drouhardii</i>	38
Figure 32 : <i>Lepironia articulata</i>	38

Figure 33 : <i>Typhonodorum lindleyanum</i>	39
Figures 34 : Jacinthe d'eau avec ses rhizomes bulbeux servant de flotteurs.....	40
Figure 35 : <i>M. oleifera</i> en culture (Bel Avenir, Mangily).....	42
Figures 36 : Feuilles (36a), inflorescences (36b) et détails des fleurs (36c) de <i>M. oleifera</i>	42
Figures 37 : Gousses (37a), graines dans une gousse (37b) et graine (37c) de <i>M. oleifera</i>	43
Figure 38 : Comparaison de la température de l'atmosphère avec la température de l'eau du bassin couvert de la jacinthe d'eau pendant 7 jours et à la même heure	44
Figures 39 : pH de l'eau avec l'implantation de la jacinthe d'eau (39a) et avec la tige de moringa (39b).....	45
Figures 40 : Valeurs de l'oxygène dissous avec l'implantation de la jacinthe d'eau (40a) et avec l'introduction de la tige de moringa (40b) mesuré pendant 7 jours	45
Figures 41 : Valeurs de la conductivité avec l'implantation de la jacinthe d'eau (41a) et avec l'introduction de la tige de moringa (41b)	46
Figure 42 : Schéma de la station d'épuration proposée	54

Introduction

Les eaux usées, appelées également effluents ou eaux résiduaires, sont définies par le dictionnaire Larousse agronomique (1985) comme l'ensemble des eaux ménagères, des eaux industrielles, des eaux du service public, des eaux de drainage et des eaux de vanes (partie liquide contenue dans les fosses d'aisance et dans les bassins de vidange). Ce sont des eaux polluées de nature à contaminer les milieux dans lesquels elles sont déversées. Elles proviennent essentiellement des activités domestiques et industrielles ainsi que des eaux souterraines et des précipitations ; ces catégories d'eaux usées sont communément appelées respectivement eaux domestiques (eaux « grises » et eaux « noires »), déchets industriels et eaux pluviales. (ENCYCLOPEDIE ENCARTA, 2005).

Les polluants de l'eau peuvent être classés selon leur nature en trois catégories : physiques, chimiques et bactériologiques.

Les excès de polluants entraînent des conséquences néfastes sur l'environnement. Par exemple, les effluents contenant de quantité importante en nitrate et phosphate peuvent provoquer un phénomène d'eutrophisation dans le milieu aquatique. Par ce phénomène, les végétaux aquatiques forment une fleur d'eau qui empêche la pénétration de la lumière et de l'oxygène dans l'eau. Alors, les végétaux chlorophylliens ne peuvent plus faire de photosynthèse, les animaux aquatiques meurt d'asphyxie. Il y a donc un dérangement de la chaîne alimentaire.

Les eaux usées non traitées s'infiltrent dans la nappe phréatique et contaminent les eaux de boisson. Les polluants bactériologiques sont responsables de différentes maladies épidémiques pour l'homme comme le choléra, fièvre typhoïdes, maladies diarrhéiques et des différentes maladies épidermiques. Pour ces différentes causes, les pays dans le monde établissent des normes sur la qualité des eaux résiduaires émis en surface.

1. Problématique

La commune urbaine de Toliara a un problème sur les systèmes de collecte et de traitement des eaux usées suite à l'expansion démographique et aux conséquences de l'exode rural. Ces facteurs augmentent la consommation d'eau et donc augmentent les besoins de gestion des rejets des eaux usées.

Les canaux d'évacuation des eaux usées existants se terminent à la mer sans traitement préalable. L'environnement urbain et les récepteurs naturels deviennent de plus en plus fragiles et demandent une plus grande protection contre la pollution. En outre, cette pollution affecte l'eau de baignade et les produits pêchés (RAKOTOVAO, 2004).

La qualité des produits halieutiques consommés par la population ainsi que l'eau de baignade sont mises en doute. Pour éviter une dégradation rapide et irréversible du milieu naturel, il est devenu nécessaire d'évaluer les besoins et de réaliser des installations d'épuration des eaux usées.

2. Choix du sujet

Des normes existent pour la qualité d'eau usée qu'on peut déverser dans le milieu naturel. L'eau rejetée dans ce milieu doit avoir une teneur minimum acceptable en bactéries et en éléments chimiques nocifs pour qu'elle ne provoque pas des effets indésirables à l'environnement. Pour Madagascar, la législation portant sur le code de l'eau prévoit la gestion, la protection de l'eau et l'organisation du secteur de l'eau et de l'assainissement par la réglementation de rejets vers le milieu naturel (annexe 1). Les analyses des eaux usées de la ville de Toliara faites et publiées par RAKOTOARISON (2008) permettent d'estimer le degré de pollution de ces effluents. Les résultats de l'analyse (annexe 2) montrent que le rejet des eaux municipales de la ville de Toliara n'est pas conforme à la norme appliquée à Madagascar. Un traitement préalable est donc nécessaire pour conserver l'écosystème naturel et respecter la législation.

Diverses techniques peuvent être utilisées plus ou moins coûteuses. Les conditions économiques difficiles de Madagascar rendent peu probable la mise en place rapide d'un système d'épuration avec des équipements coûteux. En conséquence, la phytoépuration moins coûteuse et plus simple à exploiter que les autres systèmes d'épuration, respectant l'environnement constitue une alternative crédible ou une contribution au traitement des eaux usées à Toliara.

Ces diverses raisons ont incité à choisir comme thème de recherche : « La faisabilité de la phytoépuration des eaux usées dans la ville de Toliara ».

3. Objectifs de l'étude

3. 1. Objectif principal

L'objectif principal de cette étude est d'étudier une technique de traitements des eaux usées domestiques de la ville de Toliara en respectant les normes existantes avant tout rejet en milieu naturel

3. 2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de cette étude sont de :

- Évaluer le besoin en eau de la population et la quantité des eaux usées rejetées.
- Connaître le système d'évacuation des eaux usées de la ville de Toliara.
- Identifier les problèmes posés par l'évacuation des eaux usées de la ville.
- Identifier le mode de rejet et de traitement individuel des eaux usées.

- Analyser le système de phytoépuration pour le traitement des eaux usées de la ville.
- Choisir des plantes épuratrices pouvant être utilisées pour l'épuration.
- Valoriser les biomasses des plantes épuratrices utilisées.

4. Hypothèses à vérifier

Afin de mener à bien cette étude, notre réflexion se porte sur les points suivants :

- Aucune station de traitement des eaux usées n'est installée à Toliara.
- Des plantes épuratrices d'eaux usées existent à Toliara.
- Les eaux usées de Toliara peuvent être épurées à l'aide des plantes épuratrices.

Cet ouvrage se divise en trois parties : la première partie présente la zone d'étude. La deuxième partie est consacrée à la méthodologie adoptée durant l'étude. L'analyse et la restitution des résultats obtenus sont traitées dans la troisième partie. Une conclusion avec des recommandations suivies d'une bibliographie sont présentées en dernier lieu.

I. Localisation de la zone d'étude

La ville de Toliara est construite sur la côte sud-ouest de Madagascar, à 945 km au sud de la capitale de Madagascar dans la direction Sud-Ouest suivant l'axe RN7. La ville est de 8 m d'altitude et située entre les coordonnées géographiques suivantes : 43°44 de longitude Est, 23°26 de latitude Sud. Elle se trouve au Nord du tropique du capricorne (figure 1).

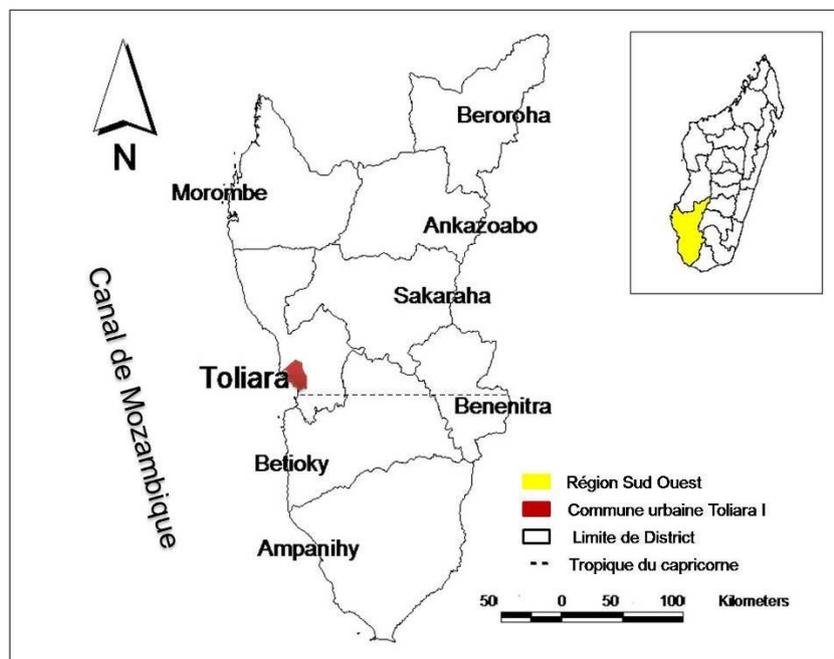


Figure 1 : Localisation de la ville de Toliara
(MONOGRAPHIE DE LA VILLE DE TOLIARA, 2012)

La commune urbaine de Toliara I est située au Nord par la fleuve Fiharena, au Sud et à l'Est par la commune rurale de Toliara II, à l'Ouest par le canal de Mozambique. Toliara ville est divisée en six districts ou *Firaisana* (figure 2) : Besakoa, Betania, Tanambao I, II Tanambao, Mahavatse I et II Mahavatse avec 41 « quartiers » ou *Fokontany*. Elle couvre une superficie de 18 km² (MONOGRAPHIE DU SUD-OUEST, 2011).

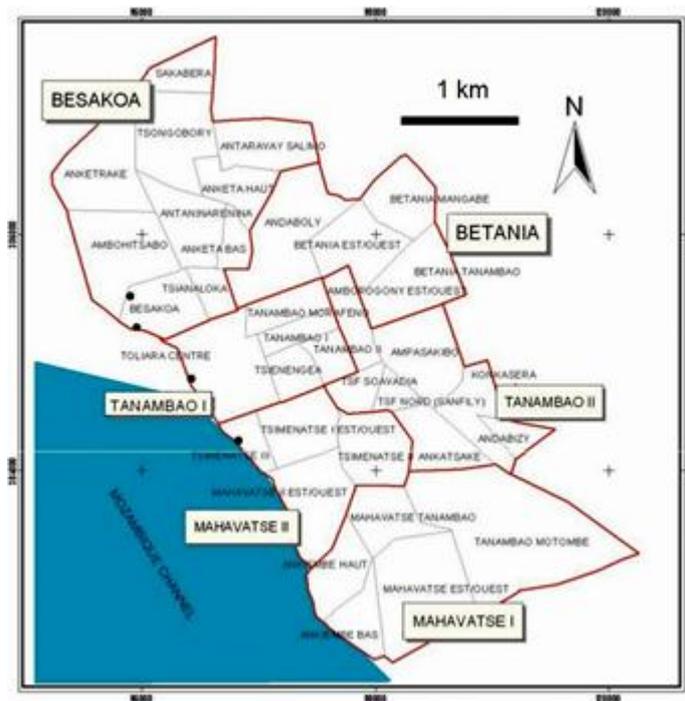


Figure 2 : Carte de la commune urbaine de Toliara (MONOGRAPHIE DE LA VILLE DE TOLIARA, 2012)

Légendes : Trait rouge : Limites d'arrondissements ; trait noir : Limites de Fokontany.
 ● : localisation des sites d'étude

I. 1 - Climatologie

La ville de Toliara a un climat aride et semi-aride caractérisé par une faible pluviométrie.

I. 1. 1. Pluviométrie

A Toliara, la pluie tombe sous forme de pluie pendant des tempêtes, des cyclones ou des dépressions tropicales. Durant les dix dernières années, la précipitation annuelle de Toliara a été faible variant de 1 à 148 mm (MONOGRAPHIE DE LA VILLE DE TOLIARA, 2012).

Le maximum de précipitation se trouve en janvier et la saison de pluie dure environ cinq mois du mois de novembre au mois de mars (figure 3).

L'irrégularité des pluies dans le sud-ouest malgache est due à plusieurs phénomènes : le passage du courant marin froid sur le littoral diminuant l'évaporation en mer. Le « Tsiokatimo », vent sec venant du sud, souffle fortement entre les mois de mai et août.

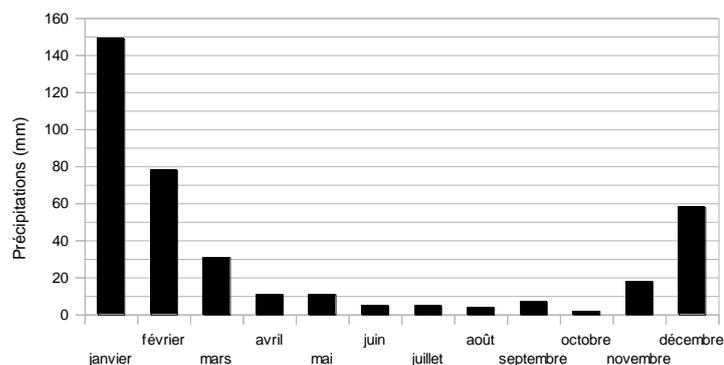


Figure 3 : Répartition des pluies dans une année dans la ville de Toliara (MONOGRAPHIE DU SUD-OUEST, 2011)

I. 1. 2 - Température

A Toliara, les mois de juin et juillet sont les plus frais. A cette période, la température nocturne est en dessous de 20°C. En janvier et février et février, elle augmente jusqu'à plus de 30°C. L'amplitude thermique varie de 6 à 11°C (MONOGRAPHIE DE LA VILLE DE TOLIARA, 2012). La température moyenne annuelle est de 26°C.

I. 2 - Démographie

L'exode rural et la migration ont une grande influence sur l'augmentation de la population, et sur l'occupation des sols dans la périphérie de la ville, et dans certains quartiers populaires. En effet, les éleveurs nomades qui s'installent en ville se satisfont d'habitations précaires et de conditions minimales d'hygiène. La démographie de Toliara est :

- 214 000 habitants avec un taux d'accroissement annuel de 2,4 % (MONOGRAPHIE DU SUD OUEST, 2011).
- 38 500 ménages avec une taille moyenne de ménage égal à 5,6 personnes.

I. 3 - Infrastructures de base

Le noyau central de la ville de Toliara a été bâti selon le plan d'urbanisation de 1963. Depuis, se sont érigés de nouveaux quartiers résidentiels bordant les artères principales. Des villages occupant des zones marécageuses difficiles à assainir par suite de l'extension de la ville vers le Nord et vers le Sud.

I. 4 - Structures de gouvernance locale

Le maire de la commune urbaine de Toliara I est le chef de l'administration. Il est élu par les résidents pour une durée de quatre ans.

- La Direction Régionale de l'Environnement et des Forêts(DREF) a un rôle principal de définir des stratégies pour la préservation de l'eau, du sol et de l'air contre la pollution, des

animaux et des plantes. Cette direction régionale collabore avec l'Office National de l'Environnement (ONE).

- Le bureau municipal d'hygiène (BMH) qui contrôle l'hygiène de la ville et la santé publique.
- Une Autorité Nationale de l'Eau et de l'Assainissement (ANDEA) a été mis en place pour s'occuper de la gestion des ressources en eau ainsi que les déchets liquides. Elle est rattachée directement à la direction régionale de l'eau. Ce service travaille sur le système d'infrastructure de l'eau et de l'assainissement.

I. 5 - Plan d'urbanisme de la ville

Madagascar est classé parmi les pays pauvres sur la base des indicateurs de la pauvreté. Dans la ville de Toliara, les plus pauvres jouent un rôle dans le changement de comportement. La relation entre les pauvres et la gestion des eaux usées est forte. Les familles n'arrivent pas à couvrir le frais des installations sanitaires suivant la norme. En outre, la réglementation sur le plan d'aménagement de la ville de Toliara n'est pas respectée par les autorités municipales. Dans certains quartiers de la ville, Tsimenatse par exemple, il y a des problèmes d'accès faute de réseau routier. La collecte des ordures, la vidange des fosses septiques et l'intervention rapide des secouristes en cas d'incendie par exemple y sont pratiquement impossibles. Par conséquent, la plupart des ménages ont des problèmes pour l'évacuation des eaux usées. Les risques environnementaux sont liés à la dégradation de cet environnement urbain. Il convient d'alerter la population sur les risques de pollution de l'eau et la contamination des eaux souterraines causée par les comportements individuels et l'absence de la politique de la ville.

I. 6 - Les sites d'étude

La ville de Toliara a été choisie pour mener cette étude en tant que chef-lieu de la région et une zone touristique. Elle mérite d'avoir des infrastructures de normes acceptables. Aucune station de traitement des eaux usées n'est encore installée dans la ville de Toliara. Or Tous les canaux d'évacuations installés jettent directement les eaux usées à la mer sans traitement préalable qui alourdissent ce milieu en charges polluantes et provoquent d'innombrables effets néfastes à l'environnement. Quatre sites ont été choisis pour mener cette étude : trois canaux d'évacuation à la mer qui se trouvent à Besakoa, à côté de l'hôtel Palétuvier de Toliara centre et la sortie Tsimenatse. Trois sites sont caractérisés par la présence des étangs couverts de jacinthe d'eau. Le quatrième se trouve chez un particulier à Besakoa.

II. Méthodologie

II. 1 - Les traitements des eaux usées par la phytoépuration

II. 1. 1 - Généralités

Les traitements des eaux usées sont les processus fait dans le but de diminuer la quantité des polluants pour atteindre la norme de rejet des effluents dans le milieu naturel ou de réutiliser l'eau. Le traitement des eaux usées a pour but de diminuer suffisamment la quantité de substances polluantes des eaux usées et de restituer au milieu naturel une eau qui est loin d'être pure, mais qui apporte le moindre danger (RAKOTOARISON, 2008). « **Phyto** » signifie en grec « **plante** ». Le mot phyto-épuration veut donc dire épuration avec l'aide de plantes.

La phytoépuration est un système de traitements des eaux usées en utilisant le pouvoir épurateur des plantes. Ces plantes sont des microphytes et/ou des macrophytes. Elle est souvent appelée lagunage à microphytes ou lagunage aéré et lagunage à macrophytes ou filtres plantés.

II. 1. 2 - Les types de lagunage

II. 1. 2. 1- Le lagunage à microphytes

Elle consiste à créer un bassin de faible profondeur où l'eau va stagner pendant une période plus ou moins longue. Les microphytes, qui sont des algues planctoniques, se développent dans ce bassin. Elles consomment la pollution azotée et phosphatée dans les eaux usées. Le lagunage à microphytes est souvent le premier bassin d'une station de lagunage car ce traitement est insuffisant et nécessite un lagunage à macrophyte. Les rôles des microorganismes dans l'épuration des eaux usées sont :

- la photosynthèse produite par les algues augmente la teneur en oxygène de l'eau qui affecte à leur tour les éléments nutritifs et les réactions ;
- elles se nourrissent des effluents et dégradent la matière organique qui devient dès lors assimilable par les plantes.

Il y a donc une étroite coopération entre les plantes et les micro-organismes.

II. 1. 2. 2 - Le lagunage à macrophytes

Ce type de traitement nécessite des plantes macrophytes originaires des zones humides naturelles. Cette filière d'épuration s'appuie sur le pouvoir épuratrice des végétaux hydrophytes ou héliophytes. Les eaux usées séjournent simplement dans des séries des bassins à ciel ouvert peuplés de ces végétaux. Les rôles des végétaux macroscopiques dans l'épuration des eaux usées sont importants dans le traitement des eaux usées :

- elles sont le support des bactéries : les plantes épuratrices abritent une flore bactérienne importante ;
- Elles récupèrent les matières minérales dégradées par les bactéries ;
- elles stabilisent les substrats, tout en améliorant leur perméabilité et limite la vitesse des flux d'eau, ce qui permet à la matière en suspension, le carbone, les éléments nutritifs et les oligo-éléments d'intégrer les tissus végétaux ;
- elles produisent de l'humus au moment de leur décomposition ;
- elles aèrent le substrat en apportant de l'oxygène entre leur tige et les racines.

Elles améliorent aussi considérablement la valeur esthétique du site. Toutes les espèces des zones humides ne sont pas appropriées pour le traitement de l'eau.

II. 1. 3 - Processus de fonctionnement de lagunage

Le lagunage consiste à écouler lentement les effluents dans des étangs artificiels peu profonds (d'ordre d'un mètre). On introduit des plantes épuratrices d'eau (filtres plantés) qui seront récoltés lorsque la plante s'est suffisamment développée, ne laissant subsister qu'un petit nombre de sujets pour la reproduction (NAS, 1979 ; PIERMONT, 1982). Cette opération se répète régulièrement de manière à obtenir un processus continu et régulier de purification des eaux et de production de biomasse (figure 4). Dans ces étangs se prolifèrent naturellement des bactéries, algues et autres organismes vivants. Ceux-ci se nourrissent des matières organiques et des sels minéraux contenus dans ces eaux usées. Elles les transforment alors en matière minérale assimilable par les plantes. En retour, les plantes aquatiques fournissent de l'oxygène aux bactéries par leurs racines. Suivant le temps de rétention des eaux résiduaires dans cette lagune, les microorganismes pathogènes diminuent sous l'action des ultraviolets grâce à l'exposition au soleil (pour le lagunage aéré).

Simultanément, le nombre des agents pathogènes tels que certaines bactéries, virus, parasites est considérablement réduit, notamment en raison de la longue période de rétention dans les réservoirs qui entraîne un dépôt par décantation puis leur mort (DEGRÉMONT, 1989).

Le déroulement des mécanismes réactionnels dans un bassin d'épuration est influencé par les paramètres physico-chimiques de l'eau (pH, température, oxygène dissous).

Les bactéries utilisent le carbone comme source d'énergie en milieu pollué. Cet élément aussi est nécessaire pour la synthèse de nouvelles cellules. Cette dégradation se fait en présence ou en absence d'oxygène.

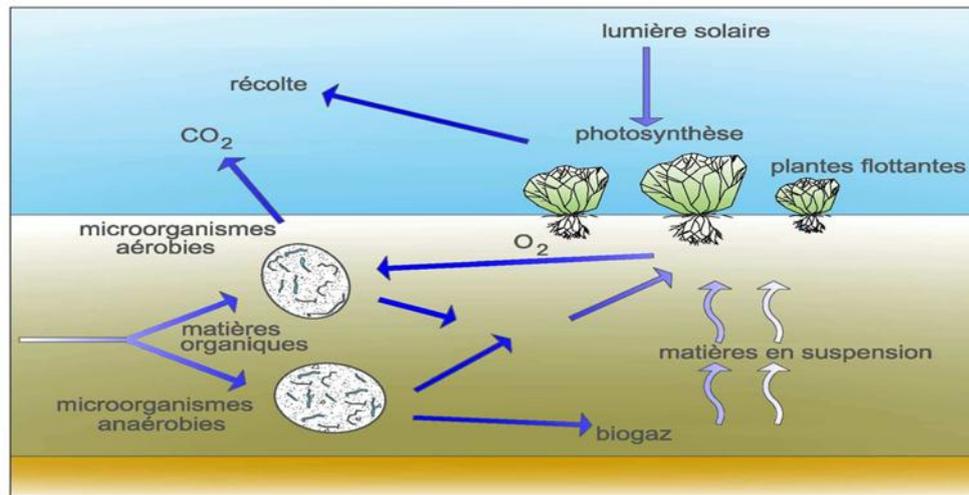


Figure 4 : Principes de l'épuration dans un bassin à macrophytes flottants (RAKOTOARISON, 2008)

II. 1. 4 - Exemple de processus d'élimination des polluants

II. 1. 4. 1- Elimination de l'azote

Dans les eaux usées, l'azote se trouve sous la forme organique d'ammonium NH_4 et de nitrate NO_3 . Les réactions d'élimination de l'azote dans un milieu aquatique sont :

- la volatilisation : c'est la transformation de l'ammonium en ammoniac,
- l'ammonification : c'est la transformation de l'azote organique en ammonium,
- la nitrification : c'est l'oxydation de l'ammonium en nitrate,
- la dénitrification : c'est la réduction des nitrates en azote gazeux, N_2 sous l'action des bactéries dénitrifiantes. Ce gaz s'échappe alors dans l'atmosphère comme le CO_2 produit par l'élimination des matières carbonées.

Dans le bassin à macrophytes, les principales réactions d'élimination de l'azote sont la nitrification/dénitrification et l'assimilation par les végétaux (figure 4). La nitrification de l'azote transforme l'ammonium en nitrate qui peut être ensuite éliminé par dénitrification effectuée par les bactéries du genre *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*. Ces bactéries utilisent l'énergie générée par ces réactions pour leur métabolisme. Ce sont des réactions strictement aérobies, et on estime que la nitrification peut se dérouler même en dessous de $0.3 \text{ mg O}_2/\text{l}$.

Lorsque la concentration en ammonium et en micronutriment est suffisante, l'oxygène dissous sera le facteur limitant pour la croissance de *Nitrosomonas*, et le nitrite pour *Nitrobacter*. Dans les conditions similaires, la croissance de *Nitrobacter* est supérieure à celle de *Nitrosomonas*, ce qui signifie que la formation de nitrite est l'étape limitant dans la réaction de nitrification.

L'assimilation de l'ammonium est une fonction de la productivité de la plante. Dans une station d'épuration, elle peut être maximisée par des récoltes régulières. La nitrification de l'azote est l'une des réactions qui contribuent à l'élimination de l'ammonium dans les stations d'épuration. Les procédés physiques et physico-chimiques d'élimination de l'azote (électrodialyse, résines échangeuses d'ions, "stripage" de l'ammoniaque) ne sont pas utilisés dans le traitement des eaux résiduaires urbaines, pour des raisons de rendement et de coût.

II. 1. 4. 2 - Elimination du phosphore

L'élimination du phosphore, ou "déphosphatation", peut être réalisée par des voies biologiques.

La réaction d'assimilation de phosphore est en fonction de la disponibilité de l'azote. Elle s'accroît avec les concentrations d'azote et peut être freinée par une carence de cet élément.

Les racines et des parties immergées des plantes épuratrices assimilent le phosphore sous forme d'orthophosphate. Cette assimilation est influencée par la disponibilité de l'azote.

En milieu acide, le phosphore inorganique réagit avec les ions ferriques et aluminiums pour former des composés insolubles qui précipitent. A pH basique, il précipite préférentiellement avec le calcium. Les valeurs de pH dans les bassins couverts de plantes flottantes sont généralement stables et comprises. Ce paramètre aura donc très peu d'influence sur la précipitation du phosphore.

II. 1. 4. 3 - Elimination de la pollution bactériologique

Dans une station de lagunage, différents processus physico-chimiques ou biologiques ont lieu et diminuent les germes pathogènes :

- Rôle bactéricide des ultraviolets (U.V.) grâce aux rayonnements solaires (d'où une faible profondeur d'eau permettant aux rayons d'atteindre le fond) ;
- Phénomène de compétition avec les espèces autochtones ;
- Forte prédation par des espèces bactériophages (zooplancton) ;
- Production de substances inhibiteur ou bactéricides naturelles (antibiotiques par exemple) par certaines bactéries et micro-algues entraînant la mort ou une baisse de la reproduction des pathogènes ;
- Durée du cycle d'épuration longue durant laquelle les germes peuvent être éliminés par ces différents processus.

Ainsi, l'eau déversée dans la nature ne contient plus une surcharge de polluants. Son traitement conduit à une logique de préservation des ressources en eaux et de protection de l'environnement.

II. 1. 4. 4 - Elimination des boues d'épuration

Un simple travail manuel à l'aide des pelles suffit d'enlever les boues dans les bassins d'épurations. Cette technique de phytoépuration produit peu de boues (environ 10 à 20 % par rapport aux bassins à boues activées). Le curage des boues se fait tous les 6 à 10 ans. C'est le premier bassin qui doit être plus souvent évacué de lagune primaire doivent être évacuées plus souvent à cause de la quantité de boue et du sable décantée. Néanmoins, cette quantité dépend de l'efficacité du prétraitement. Donc il vaut mieux construire ce premier bassin en le renforçant et en le réalisant plus profond par rapport aux autres.

II. 1. 5 - Les étapes et procédés de traitement des eaux usées

L'épuration des eaux usées par lagunage peut s'effectuer par plusieurs étapes et se fait dans une ou plusieurs lagunes aérées suivies d'un ou de deux bassins de finition. Ces derniers sont des étangs à macrophytes. Un traitement des effluents doit contenir deux étapes : les prétraitements et les traitements des eaux usées.

II.1. 5. 1 - Les prétraitements

Avant d'introduire les effluents dans les bassins de phytoépuration, des traitements préalables des eaux usées sont nécessaires. Il s'agit de :

- **dégrillage** : élimination de gros déchets des eaux usées au moyen d'une grille ;
- **tamissage** : filtration de matières en suspension de petites tailles sur toile ;
- **dessablage** : évacuation des sables et graviers déposés au fond.

Ces prétraitements se font avant l'entrée des eaux usées dans le premier bassin. Le dessablage et dégraissage ont lieu dans ce bassin. Ce sont de simples étapes de séparation physique des polluants.

II. 1. 5. 2 - Les traitements

Ils regroupent les procédés visant à éliminer par décantation une forte proportion de matières minérales ou organiques en suspension. Les procédés biologiques habituellement utilisés sont aérobies, c'est-à-dire que les organismes agissent en présence d'oxygène dissous.

Les différentes étapes à suivre pour un traitement des eaux usées sont :

- La coagulation qui a pour but de destabiliser les particules en suspension c'est-à-dire de faciliter leur agglomération.
- La floculation qui a pour objectif de favoriser le contact entre les particules destabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on peut facilement éliminer par décantation.
- La filtration : c'est un procédé destiné à clarifier un liquide qui contient des matières

solides en suspension.

- La désinfection : c'est un traitement qui permet d'éliminer les microorganismes. Ce traitement n'inclut pas nécessairement la stérilisation qui est la destruction de tous les organismes vivants dans le milieu.

Dans certains cas, d'autres traitements sont nécessaires, notamment lorsque le milieu récepteur de l'eau exige un traitement plus poussé ou lorsque l'effluent final est destiné à être réutilisé.

II. 1. 6 - Conception d'une station de phytoépuration

Le lagunage est utilisé pour le traitement des effluents domestiques d'une région qui ne dépasse pas 2000 habitants. Une étude préalable du sol est recommandée avant d'installer les bassins épurateurs pour éviter toute contamination avec le milieu. Cette étude concerne la perméabilité du sol, la présence d'une nappe phréatique, s'il y a un risque d'infiltration, il vaut mieux étanchéifier le fond du bassin en mettant un film plastique ou en apportant de l'argile. Pour diminuer les dépenses liées au traitement des eaux (nécessité de pompage électrique par exemple), il faut que le sens d'écoulement de l'eau suive la pente naturelle du terrain. Les données de base sont les suivantes.

II. 1. 6. 1 - Le temps de rétention de l'eau dans le bassin

Pour avoir un bon rendement, les eaux à traiter restent plus longtemps (plus de 20 jours) dans les bassins d'épuration pour traitement des effluents par lagunage aéré seul. L'emploi de la technique de filtres plantés prend un avantage pour cette durée. Le temps de rétention des effluents dans un bassin à filtres plantés est de 7 jours environ (MACROPHYTES ET TRAITEMENTS DES EAUX, 2005). C'est pourquoi que les bassins se fonctionnent en alternance.

II. 1. 6. 2 - Nombre du bassin

Le traitement des eaux usées est constitué de deux étages au minimum eux-mêmes sont composés de deux ou trois filtres en parallèle fonctionnant en alternance. L'objectif de cette alternance est d'obtenir le temps de repos des eaux à traiter pour permettre à les épurer.

II. 1. 6. 3 - Le dimensionnement du bassin

Le calcul du dimensionnement des bassins dans un lagunage à macrophytes se fait en suivant le nombre d'habitants qui se traduit en l'équivalent-habitant (EH) c'est-à-dire une unité conventionnelle qui représente la moyenne de la charge polluante engendrée par habitant et par jour, dans un volume moyen de 150 litre d'eau. L'épuration par lagunage aéré seul a besoin d'une surface de 10m²/ EH tandis que la surface des bassins à filtres plantés est en dessous de la

moitié de celle-ci. C'est pour cette raison que le lagunage à microphytes seul n'est pas praticable en milieu urbain. Il est plutôt destiné en milieu rural.

Un guide de traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés des macrophytes, élaboré en 2005 par un groupe français « MACROPHYTES ET TRAITEMENT DES EAUX » définit la lagune d'épuration comme suit : Surface totale de lagune : 2 à 2,5 m²/habitant dont : 1^{er} étage (constitué de 3 lits en parallèle) : 1,2 à 1,5 m²/habitant et 2^{ème} étage (constitué de 2 lits en parallèle) : 0,8 à 1 m²/habitant. Les fonds des bassins sont aménagés en légère pente afin de faciliter l'écoulement des eaux et pour une homogénéisation dans le bassin (RAKOTOARISOA, 2011).

II. 1. 6. 4 - Les contrôles de la station d'épuration

Le contrôle des rejets des stations d'épuration s'inscrit dans le cadre général de l'autosurveillance réalisée par l'exploitant. Cette surveillance s'effectue sous le contrôle des services administratifs.

II. 1. 6. 5- Exemple de contrôle de station d'épuration des pays développés

L'autosurveillance concerne le système d'assainissement dans son ensemble, c'est-à-dire le réseau de collecte et les stations de traitement des eaux usées.

Elle consiste en une série de mesures pratiquées par l'exploitant de la station d'épuration. Elle permet de mesurer l'efficacité de l'épuration, de s'assurer du respect des normes de rejets, de la bonne élimination ou évacuation des sous-produits de l'épuration (boues, graisses, etc.) et de détecter les éventuelles anomalies de fonctionnement de l'installation.

Concrètement, les responsables des stations d'épuration établissent chaque mois et année un rapport de fonctionnement contenant les mesures, qu'ils envoient au service chargé de la police de l'eau et à l'Agence de l'eau. Les mesures effectuées portent sur plusieurs paramètres: le débit de l'eau rejetée, les matières en suspension (MES), la DBO₅, la DCO, l'azote, l'azote ammoniacal, les nitrites, les nitrates, le phosphore et les boues d'épuration. La fréquence de ces analyses est fixée par la réglementation et varie en fonction de la taille de la station d'épuration. Par exemple, les mesures portant sur le débit, les MES, la DCO et la DBO₅ sont quotidiens dans les installations d'une capacité supérieure à 300 000 équivalents-habitants.

Les contrôles officiels. Les services chargés de la police des eaux auprès du préfet vérifient la qualité du dispositif de surveillance mis en place par l'exploitant. Cette vérification s'opère à deux niveaux, par le contrôle des documents tenus par l'exploitant et par des visites sur place pour constater la validité des informations transmises.

Le service chargé de la police des eaux est destinataire des bilans mensuels et annuels des résultats des analyses des rejets et du suivi du fonctionnement du réseau de collecte et de la

station d'épuration. En cas d'anomalie détectée par l'exploitant, ce dernier doit lui communiquer immédiatement le résultat des analyses. En outre, le service chargé de la police des eaux valide le manuel d'autosurveillance rédigé par l'exploitant des installations d'assainissement et décrivant son organisation interne, ses méthodes d'analyse et d'exploitation. Ce manuel est remis à jour périodiquement. Pour compléter ces opérations de contrôle, il peut procéder à des contrôles inopinés et réaliser des analyses.

II. 1. 7 - Le traitement des eaux pluviales

Dans certains cas, il est nécessaire de traiter les eaux pluviales. Le type de traitement qui leur est appliqué dépend du mode de collecte de ces eaux en réseau séparatif où les matières véhiculées dans les eaux par temps de pluie se déposent facilement. De ce fait, il est intéressant de les traiter par décantation avant de les rejeter. Et en réseau unitaire où les eaux pluviales et eaux usées sont regroupées. Le principal problème se pose lors de fortes chutes de pluie : éviter que ce mélange, très nocif, ne se répande dans le milieu naturel, du fait de la "saturation" du système d'assainissement. Pour limiter ces phénomènes de déversement dans le milieu naturel, des "bassins d'orage" sont aménagés pour stocker une partie des eaux durant les précipitations. On peut ensuite, par temps sec, progressivement déstocker ces eaux et les acheminer vers la station d'épuration pour les traiter.

II. 2 - Etude bibliographique

Cette phase fait l'objet de la collecte des informations existantes concernant le thème étudié. Ce premier pas de mise en marche de l'étude s'est effectué en analysant la littérature dans diverses bibliothèques et sur Internet.

II. 3 - Enquêtes

Des questionnaires ont été établis au niveau de :

- La Mairie dans le but d'avoir des informations sur le plan d'urbanisme de la ville de Toliara et sa politique d'assainissement.
- La JIRAMA afin de savoir l'utilisation de l'eau par la population de Toliara
- Des sociétés industrielles, restaurants, hôteliers et hôpital pour avoir leurs informations sur l'évacuation des déchets
- De quelques ménages de la ville

II. 4 - Etude sur le terrain

L'étude sur le terrain a été réalisée durant les mois d'avril 2012 au mois de janvier 2013.

II. 4. 1 - Inventaires des plantes épuratrices des eaux usées à Toliara

L'inventaire se fait par observation directe des plantes qui poussent sur les canaux d'évacuation et bassins de rétention des effluents des particuliers.

II. 4. 2 - Critères de choix des plantes épuratrices

Les plantes épuratrices doivent répondre aux conditions suivantes :

Pour les plantes aquatiques :

- la plante aquatique utilisée ne peut pas être utilisée par la population autour de la station d'épuration pour éviter tout risque de contamination. Cette plante n'est pas comestible.
- Elle est tolérante aux apports en polluants et aux conditions climatiques existantes

Pour toutes les espèces utilisées pour le traitement des eaux :

- Elles ont une croissance rapide pour assurer la continuité du traitement.
- Sa biomasse est valorisable pour éviter l'excès de déchets.
- Elle n'est pas toxique.
- Elle a un rendement épuratoire élevé.
- Elle ne doit pas être une espèce nouvellement introduite.
- Elles n'ont pas besoin beaucoup d'espace.

II. 4. 3 - Expérience d'épuration des eaux usées

II. 4. 3. 1 - Les paramètres étudiés

Les paramètres étudiés sont limités en l'absence de laboratoire et de l'insuffisance des appareils de mesure. Malgré ces contraintes, les données obtenues permettent de tirer une conclusion sur les techniques de traitements des eaux usées choisies.

Les paramètres étudiés sont la température, la conductivité, le pH et l'oxygène dissous.

II. 4. 3. 2 - La température

Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau.

La température doit être mesurée sur place. Les appareils de mesure de la conductivité ou du pH possèdent généralement un thermomètre intégré.

II. 4. 3. 3 - La conductivité

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement.

La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente.

Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. La procédure est simple et permet d'obtenir une information très utile pour caractériser l'eau. La conductivité est également l'un des moyens de valider les analyses physico-chimiques de l'eau.

II. 4. 3. 4 - Le pH (potentiel Hydrogène)

Le pH mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité (tableau 1). Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau.

Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie.

Tableau 1 : Classification des eaux d'après leur pH.

pH	Origines des eaux
pH < 5	Acidité forte => présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée => majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

II. 4. 3. 5 - L'oxygène dissous

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que les pressions partielles d'oxygène dans le liquide et dans l'air soient en équilibre. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique (donc de l'altitude), de la température et de la minéralisation de l'eau : la saturation en O_2 diminue lorsque la température et l'altitude augmentent.

La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique et de la photosynthèse.

C'est un paramètre utilisé essentiellement pour les eaux de surface. Une eau très aérée est généralement sursaturée en oxygène (torrent), alors qu'une eau chargée en matières organiques dégradables par des micro-organismes est sous-saturée. En effet, la forte présence de matière organique, dans un plan d'eau par exemple, permet aux micro-organismes de se développer tout en consommant de l'oxygène.

L'oxygène dissous est donc un paramètre utile dans le diagnostic biologique du milieu eau.

II. 4. 3. 6 - Appareil de mesure des paramètres étudiés

Ces paramètres sont mesurés par avec un kit multiparamètre model Multi 340i (figure 5). Ce kit est composé d'un écran pour afficher les valeurs des paramètres, des solutions pour le calibrage de l'appareil et des sondes pour chaque paramètre à mesurer et des béciers. Il est accompagné des manuels pour faciliter la manipulation de l'appareil.



Figure 5 : Photo du kit multiparamètre modèle Multi 340i (RAJAONARIVELO, 2012)

II. 4. 4 - Expériences dans un bassin

II. 4. 4. 1 - Culture de la jacinthe d'eau dans le bassin

Un bassin long de 3 m et large de 2 m se trouve chez un habitant du quartier Besakoa. Aménagé depuis peu avec plantation d'une plante épuratrice, il sert de déversoir des effluents de la famille et à l'eau de ruissellement après chaque pluies (figures 6).



6a : Bassin avant aménagement



6b : Bassin après aménagement et plantation de jacinthe d'eau

Figures 6 : Photos du bassin à Besakoa avant (6a) et après (6b) aménagement et plantation (RAJAONARIVELO, 2012)

Les paramètres de l'eau dans le bassin ont été relevés trois fois par jours (matin, midi et après midi) pour voir les variations des paramètres des effluents dans la journée et la croissance d'une plante aquatique, la jacinthe d'eau ou calamote (*Eichhornia crassipes*).

II. 4. 4. 2- Suivi de la régénération de la jacinthe d'eau dans le bassin

La culture se fait en trois périodes pour comparer le développement de la plantes suivant les conditions climatiques :

- Période froide et sèche (mai, juin, juillet).
- Période chaude et sèche (août, septembre, octobre).
- Période chaude et pluvieuse (novembre, décembre, janvier).

Des pieds de jacinthe d'eau, préalablement comptés et pesés, ont été introduits dans le bassin. Le nombre de pieds initial ainsi que le poids de la biomasse sont le même pour ces trois périodes. Les jacinthes d'eau sont ensuite sorties de l'eau chaque 15 jours pour être comptées, égouttées, pesées et remises à l'eau.

II. 4. 4. 3 - Culture expérimentale de la jacinthe d'eau

Des expériences ont été faites avec l'eau usée afin de vérifier l'épuration par les plantes choisies (figure 7). La culture se fait dans des cuvettes remplies de 40 l d'eau grise du bassin. La mesure se fait à l'aide d'une bouteille plastique de un litre (figure 7b). La culture est surveillée pour éviter tout apport exogène à l'expérience.



7a : Prélèvement de l'eau grise pour la culture



7b : Culture expérimentale en bassines plastiques

Figures 7 : Photos de la méthode utilisée pour étudier l'épuration par les jacinthes avec de l'eau grise (7a) et hors du bassin (7b). (RAJAONARIVELO, 2012)

II. 4. 5 - Evaluation de la biomasse disponible de la jacinthe d'eau à Toliara

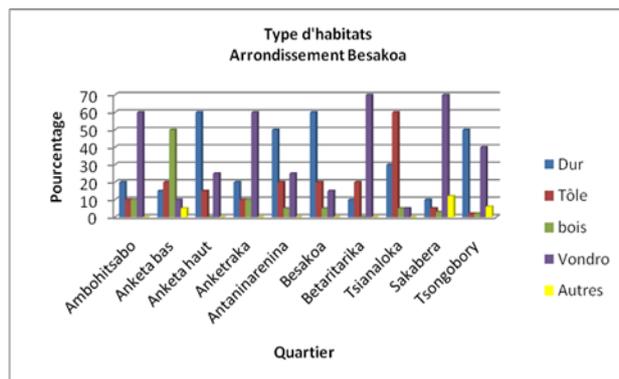
La mesure est réalisée dans les étangs à Toliara centre près de canal d'évacuation. Une échelle métallique qui délimite 10 placeaux de 1 m², est déposée de façon aléatoire à la surface de l'eau. Toutes les jacinthes d'eau se trouvant dans chacun des placeaux sont ramassées, comptées, égouttées et pesées. La moyenne des poids de matière fraîche, donne une évaluation de la biomasse totale par m² et la moyenne du nombre d'individus fournit la densité.

III. Résultats et interprétations

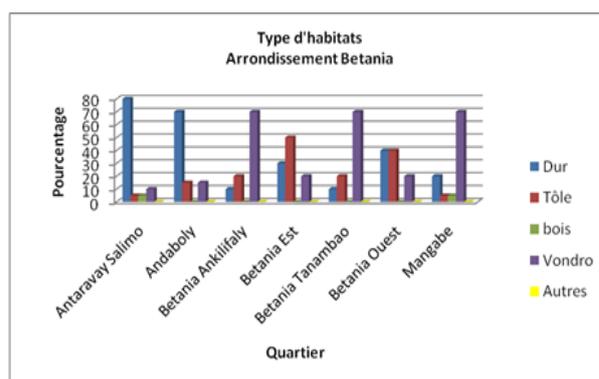
III. 1 - Le constat : enquêtes et observations sur le terrain

III. 1. 1 - Type d'habitats et des lieux d'aisance dans la ville de Toliara

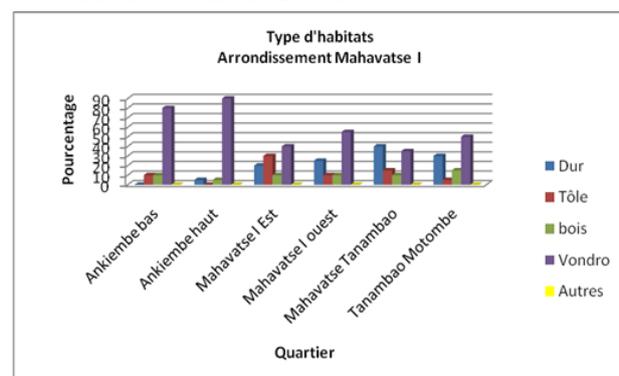
A Toliara, l'habitat se caractérise par un mélange de maisons traditionnelles et modernes. La maison traditionnelle est généralement construite en planches, tôles ou en joncs. 30 à 45% de la population construit leur maison de manière traditionnelle. Moins de 10% de constructions de la ville suit la norme (figures 8).



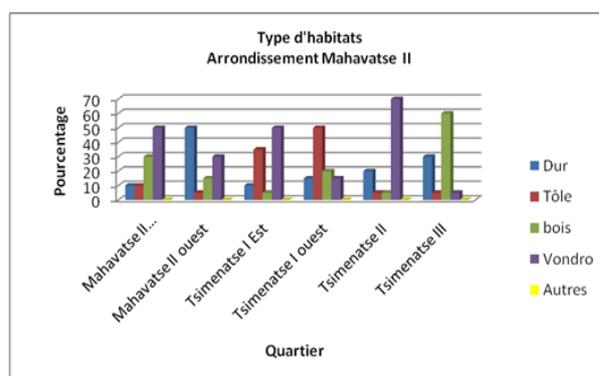
8a : Arrondissement Besakoa



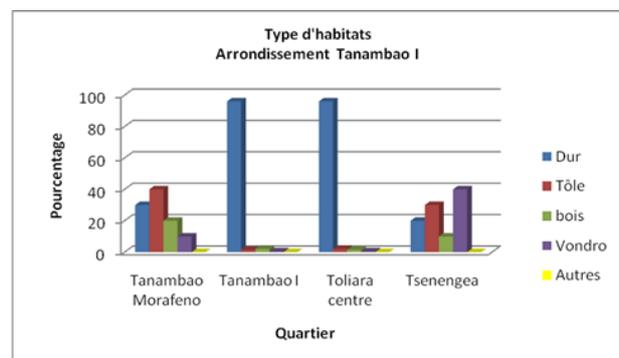
8b : Arrondissement Betania



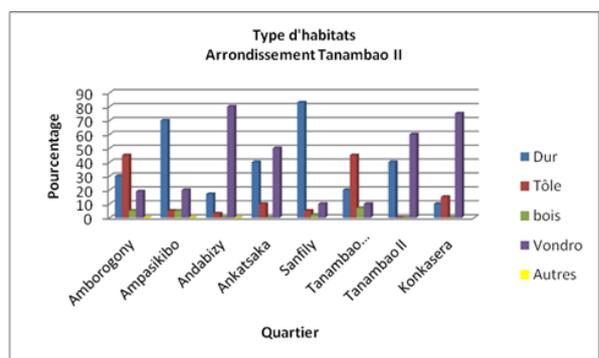
8c : Arrondissement Mahavatse I



8d : Arrondissement Mahavatse II



8e : Arrondissement Tanambao



8f : Arrondissement Tanambao II

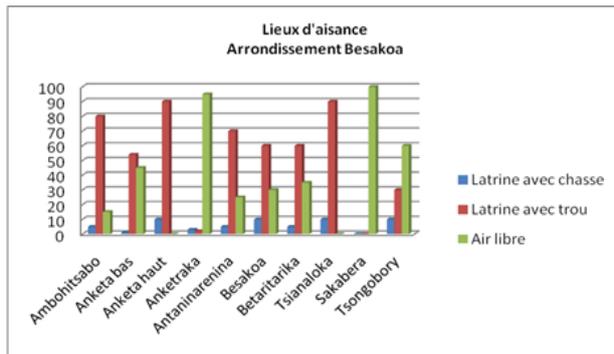
Figures 8 : Types d'habitats par arrondissement (RAJAONARIVELO, 2012)

Le service technique de la mairie n'est pas exigeant sur le type d'habitat construit. Plus de 60% des maisons en dur installées dans la ville n'ont pas de permis de construire.

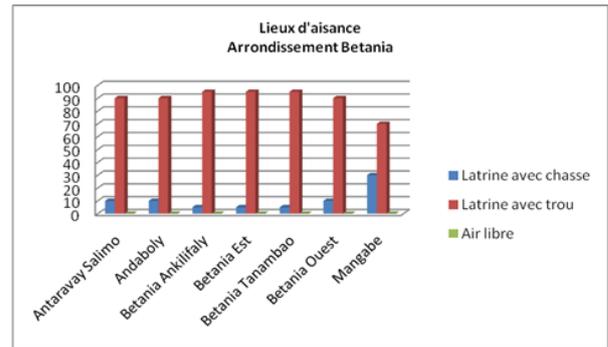
En 2011, l'Etat a des projets d'embellir l'habitat urbain de Madagascar en construisant le « *trano mora* », des logements peu chers. Toliara bénéficie de ce projet à Andranomena et à Motombe.

L'ONG « Habitat » a aussi le même projet que les « *trano mora* » dans le quartier d'Antaravay.

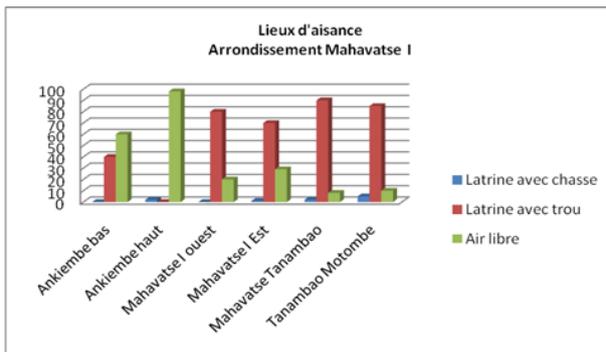
Avec ces projets, les gens peuvent avoir des maisons aux « normes » avec toilettes en les payants selon leur possibilité durant une période déterminée.



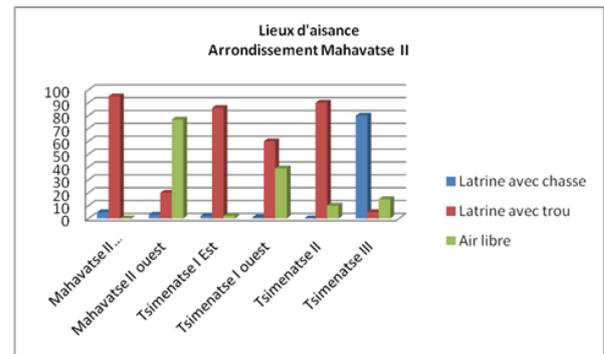
9a : Arrondissement Besakoa



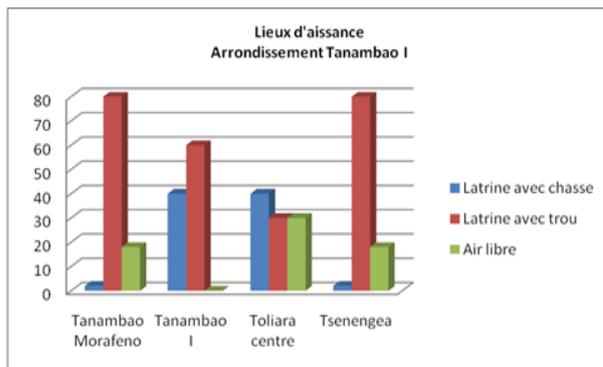
9b : Arrondissement Betania



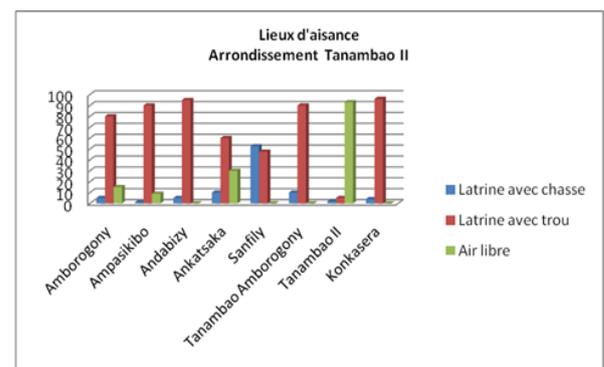
9c : Arrondissement Mahavatsé I



9d : Arrondissement Mahavatsé II



9e : Arrondissement Tanambao I



9f : Arrondissement Tanambao II

Figures 9 : Types de lieux d'aisance par arrondissement (RAJAONARIVELO, 2012)

La croissance galopante de la population et la multiplication des zones d'habitations mal structurées rendent crucial le problème de l'assainissement urbain.

En général, les habitations sont équipées d'installations autonomes non raccordées à un réseau d'égout. En 2009, environ $\frac{3}{4}$ de la population de la ville ne disposait pas de système d'installations sanitaires (SOLPHI, 2011). On estime que 65% de ces installations sont principalement constituées de latrines avec un trou ou une fosse et 11% seulement de fosses septiques. La plupart des latrines sont installées à l'extérieur de la maison et 95% ne disposent pas des puisards. En outre, 85% des eaux usées provenant de la lessive, des douches ou des cuisines sont dispersées dans la cour, la rue ou enterrées sans traitement.

A partir des résultats de l'enquête au niveau des Fokontany, les 6 arrondissements sont caractérisés par divers types de lieux d'aisance telle que les latrines avec chasse, les latrines avec trou et la défécation à l'air libre dans un lieu collectif (figures 9).

La répartition des types de lieux d'aisance enquêtés par fokontany est comme suit :

- Pour l'arrondissement Besakoa, en moyenne plus de 50% sont de latrine avec trou, sauf dans les fokontany Sakabera et Anketraka, 90% défèquent à l'air libre. Les latrines avec chasse sont rarement utilisées (moins de 5% d'habitation en moyenne).

- Dans l'arrondissement Tanambao I, en moyenne 62% des habitations utilisent la latrine avec un trou. 40% des maisons dans les fokontany de Tanambao I et Toliara centre sont équipés de latrines avec chasse.

- Concernant l'arrondissement de Betania, 70 % de la population ont des latrines avec un trou.

Les fokontany Ankiembe haut et bas se trouvent dans l'arrondissement de Mahavatse I, la plupart de l'habitation ne possède pas de latrine dont 70% s'habituent dans la nature par contre dans les fokontany Mahavatse Tanambao et Tanambao Motombe, 75% d'habitation utilisent des latrines avec un trou de 1,5 m de profondeur en moyenne.

- Pour l'arrondissement Tanamabao II, seul le Fokotany Sanfily possède en moyenne 52% de latrines avec chasse d'eau et en moyenne 75 % des habitations utilisent des latrines avec un trou et seule le fokontany Tanambao II défèque à l'air libre (en moyenne 90 %).

- L'arrondissement de Mahavatse II est caractérisé par 57% d'habitants utilisant les latrines avec un trou et 80% d'habitations du fokontany Tsimentatse III utilisent la latrine avec chasse d'eau. Et 77% d'habitation dans le fokontany Mahavatse II ouest ne dispose pas de latrines et les habitants se soulagent dans la nature.

A partir des discussions avec les chefs de Fokontany, la plupart des systèmes sanitaires et d'hygiène sont des installations autonome ; aucun raccordement avec le réseau d'égout. Et ils ont signalé que seules les nouvelles constructions en dur sont munies de fosses avec chasse d'eau

(fosse septique) mais sans égout et les latrines avec un trou servant souvent au type d'habitation moyenne. Les intervenants montrant qu'une fosse septique n'est pas à la portée de tout le monde. Ils ont évoqués aussi les problèmes de gestion des déchets : boues de latrines, l'odeur, le vidange, les eaux usées provenant de la lessive, des douches ou des cuisines. Ils entraînent parfois des conflits sociaux au sein du Fokontany.

Au niveau des quartiers, 95% des superstructures des latrines avec trou sont fabriquées en joncs (« *vondro* »), en bois ou en sac de ciment sans toiture. Et l'emplacement est mal structuré.

La commune urbaine de Toliara ne dispose d'aucun équipement de vidange des fosses septiques. Alors, au niveau des fokontany deux modes d'entretien de latrines ont été rencontré : la vidange manuelle assurée par le vidangeur (dans le quartier) et l'enfouissement des fosses lorsqu'elles sont pleines.

En effet, l'insuffisance des systèmes de gestion des déchets dans les quartiers a des impacts négatifs sur le plan socio-économique, environnemental et santé publique. Les boues de vidanges, l'odeur de latrines et les déchets accumulés, s'infiltrant dans le sol et peuvent contaminer la nappe phréatique et l'eau de mer.

III. 1. 2 - Approvisionnement en eau de la ville de Toliara

D'après l'enquête, 70% des ménages de Toliara ville ont accès à l'eau de la JIRAMA, 10% des foyers la destinent pour la cuisson et l'eau de boisson et ils emploient l'eau des puits ou des pompes « japy » (figure 10) pour le nettoyage. 20% des ménages ont besoins entièrement de l'eau des puits ou des pompes « japy ».



Figure 10 : Pompe « japy » à Tsenengea
(RAJAONARIVELO, 2013)

La JIRAMA est la seule société qui distribue l'eau de la ville. Elle a deux stations de pompage :

- La station de pompage de Miary à environ 15 km de la ville et a un débit d'environ 300 m³/H d'eau soit 7000 à 8000 m³ par jour

- La station d'Andranomena se trouve à 7 km de Toliara. Ses équipements produisent d'environ 2 000 m³/jour d'eau. Cet eau est légèrement saumâtre et alimente les quartiers sud de la ville.

La mairie gère les bornes fontaines publiques, mais le chef du Fokontany est le premier responsable dans son quartier pour la gestion de l'eau. L'infrastructure d'approvisionnement en eau est limitée, tandis que la demande en eau augmente. Plus de la moitié de la population n'a pas accès à l'eau potable cela veut dire que la plupart des ménages ne disposent pas d'installations sanitaires adéquates. Ceci est un problème croissant dans les zones urbaines où le nombre de la population augmente rapidement.

III. 1. 3 - Estimation de la consommation d'eau de la ville de Toliara

Au foyer, l'eau est utilisée pour satisfaire les besoins en eau de l'organisme (cuisson, boisson), l'hygiène corporelle et les divers nettoyages mais peu pour les latrines. La consommation d'eau par ménage varie selon le niveau de vie des gens et le nombre de personnes qui y vivent. Une évaluation du volume d'eau consommée par ménage par jour a été faite sur 88 ménages de Toliara (tableau 2).

Tableau 2 : Nombre et pourcentage des ménages suivant leur consommation journalière en eau à Toliara parmi un échantillonnage de 88 ménages (RAJAONARIVELO, 2012)

Consommation journalière (en litre)	Effectifs	Pourcentages
inférieur à 50	4	4,5
50-100	16	18,2
100-150	9	10,2
150-200	27	30,7
200-250	15	17,0
250-300	11	12,5
supérieur à 300	6	6,8
Total	88	100,0

Plus de 30% des ménages enquêtés de la ville de Toliara consomment au moins de 150 l d'eau par jour. Ceux qui possèdent des infrastructures et des équipements internes plus élevés ont besoin de beaucoup plus d'eau que les autres. Cette consommation est assez élevée par rapport aux autres villes de Madagascar (SOLPHI, 2011) à cause du climat chaud. L'enquête menée au

cours de cette étude révèle que les hôtels qui ont plus de 10 chambres consomment au moins 3 000 l d'eau par jour.

Seulement 30% de l'eau consommée par la population est utilisée pour les besoins de l'organisme (boisson, cuisson) contre moins de 10% pour les hôtels. Les restes sont utilisés pour l'hygiène. Pour 60% de la population, les eaux usées sont enterrées dans des trous temporaires ou jetés dans la cour pour mouiller le sol et limiter la poussière.

III. 1. 4 - Estimation du débit des eaux usées

La société JIRAMA produit environ 10 000 m³ d'eau par jour (300 000 m³/mois). On peut estimer un volume d'eaux usées à 7 000 m³ par jour soit 210 000 m³ dans un mois provenant de la JIRAMA. En tenant compte de la taille des ménages de la ville et la quantité d'eau consommée par ménage, la population a besoin d'environ 7 700 m³ par jour provenant de la JIRAMA, des puits et des pompes individuelles « japy ». Elle rejetterait près de 5 400 m³ d'eau usées dans la nature sans compter les eaux noires des latrines.

Vu la consommation élevée de l'eau de la JIRAMA, ce n'est pas seulement les ménages qui consomment beaucoup d'eau. Il se peut que d'autres infrastructures en consomment beaucoup comme les hôteliers et les industries et sociétés. Mais, cette augmentation peut être due aussi à la mauvaise gestion de l'eau et aux nombreuses fuites ou gaspillages : par exemple des robinets ouverts sans arrêts dans des infrastructures publiques (figure 11).



Figure 11 : Un type de gaspillage de l'eau dans l'enceinte DREN Sud Ouest (RAJAONARIVELO, 2012)

III. 1. 5 - L'évacuation des eaux usées domestiques dans la ville de Toliara

Au cours de cette étude, nous avons identifié trois canaux opérationnels pour l'évacuation des eaux usées à la mer : Tsimenatse III, hôtel Palétuvier et Besakoa. Un canal ouvert de 600 m de

long existe dans le quartier Tsimenatse I et Tsimenatse III. Les effluents d'eaux usées sont évacués directement dans la mer près du Bureau du Rotary Club.

Le canal d'évacuation principal des eaux usées et eaux pluviales a une longueur de 700 m. Il passe à Bazar-be, Commissariat de police, Cedratom, ex-Tiko, Restaurant Étoile de Mer, ex-Restaurant Hacienda. Il transporte les eaux usées domestiques, des marchés, des hôtels et des restaurants du centre ville. Un caniveau de 900 m relie la Maison-Rouge, Jardin de la mer, Hôtel Piazza, l'Alliance française (figures 12). C'est un système opérationnel de drainage des eaux pluviales.



12a



12b

Figures 12. 12a et 12b : Travaux de construction d'un système d'évacuation des eaux pluviales près du CEDRATOM-Université de Toliara au-dessus de l'Alliance française (photos de S. TOSTAIN du 6 juillet 2009)

Le système d'évacuation des eaux usées manque de maintenance. En 2008, le PDA (Plan Directeur d'Assainissement) a été mis en œuvre pour gérer les eaux de ruissellement et les eaux usées de la ville. En particulier, il permettra de déterminer et de préciser les domaines à assainir. Le PDA de la commune urbaine de Toliara fait partie de la mise en œuvre du second engagement du Madagascar Action plan (MAP) sur l'infrastructure.

La plupart des infrastructures ont été faites au cours de la période de colonisation. Les systèmes actuels de collecte des eaux usées se composent principalement des fossés traditionnels en partie couverts. Selon les ingénieurs locaux, la plupart des réseaux d'assainissement traditionnel

existants ne peuvent pas être utilisés pour le transport des eaux usées faute d'entretien et de rénovation. Le canal principal ne sert pas toute la population de la ville. Donc l'investissement dans le réseau d'assainissement doit être effectué par la commune.

Des idées de création de stations d'épuration apparaissent dans le Plan d'Urbanisme Directeur (PUDi) en 2003 mais il n'est pas encore réalisée jusqu'à maintenant. Certains quartiers ont bénéficié de canaux d'évacuation en 2008 (Tsimenatse I, TsimenatseII, Tsimenatse III et Tsienengea). Ces canaux ne sont pas couverts et ils sont remplis par des déchets solides amenés par le vent et servent de dépotoirs d'ordures.

III. 1. 6 – Autres évacuations des eaux usées à Toliara

III. 1. 6. 1- Les hôtels et restaurants

La totalité des hôtels et restaurants enquêtés de la ville de Toliara évacuent directement les eaux usées dans la nature à l'exception de l'eau des piscines (tableau 3). Ils disposent des grandes fosses pour collecter les eaux usées et les vident une fois pleine. Certains les connectent à un canal d'évacuation en mer (figure 13).



Figure 13 : Tuyaux d'évacuation d'eaux usées d'un hôtel au bord de la mer (RAJAONARIVELO, 2012)

Les hôtels consomment plus d'eau que les restaurants (tableau 3). Ceux qui ont des piscines, avec son traitement quotidiens avec des produits chimiques, émettent une quantité excessive en éléments chimiques de leurs effluents. La consommation d'eau des hôtels dépend du nombre des clients et la durée de leur séjour à l'hôtel.

Pour l'hôtel Analamaga et Mihaja Bis, le nombre de clients diminue un mois avant jusqu'à un mois après la période de la pluie (d'octobre au février) sauf en cas d'exception. Pendant les vacances (mois d'août et septembre), les clients sont abondants. Mais depuis la période de crise à Madagascar (depuis 2009), ils ont diminué énormément.

Tableau 3 : Evacuation des eaux usées de quelques hôtels et restaurants de la ville de Toliara. H: hôtel, HR : hôtels-restaurant, R : restaurant. Tous ne traitent pas leurs eaux usées et les évacuent dans la nature (RAJAONARIVELO, 2012).

Nom	Lieux	Types			Prestations	Quantité moyenne d'eau consommée (m ³ /mois)	Observation
		HR	H	R			
Le Palétuvier	Au bord de la mer	x			14 bungalows, 40 chambres, piscine	390	Recyclage avec traitements chimiques et suivi régulier de la qualité de l'eau des piscines
Le récif	Au bord de la mer		x		15 chambres, piscine	180	
Mahayana	Tsienengea		x		22 bungalows, 4 chambres, piscine	200	
Hyppocampo	Mahavatse		x		10 chambres, piscine	160	
Victory	Andabizy	x			49 chambres, piscine		
Saifee	Tsianaloka		x		22 chambres	190	
Mihaja Bis	Andabizy		x		5 bungalows, 6 chambres	92	
Analamanga	Andabizy		x		7 bungalows, 6 chambres	114	
Manatane	Au bord de la mer		x		28 Chambres	230	
Sarodrano	Bord de la mer		x		6 chambres	85	
Al Shame	Tsimenatsy		x		29 chambres	210	
Nandih	Toliara centre			x	35 couverts	45	
Tanamasoandro	Toliara centre			x	42 couverts	52	
La Colombe	Toliara centre			x	120 couverts	71	

La consommation en eau du restaurant Nandih (figure 14), même situé au centre ville, a une consommation d'eau inférieure à ces deux hôtels trouvés à la périphérie de la ville de Toliara (figures 15 et 16).

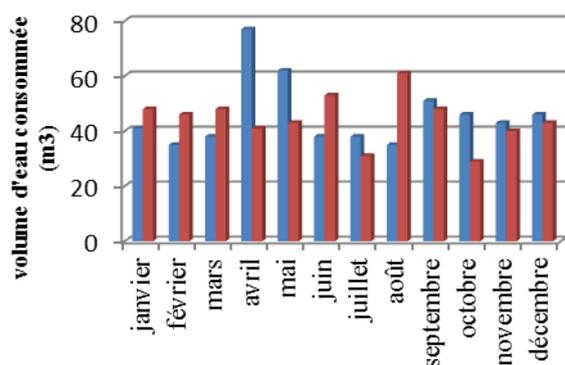


Figure 14 : Consommation d'eau du restaurant Nandih. En bleu : en 2011 ; en rouge : en 2012. (source : Restaurant Nandih, 2013)

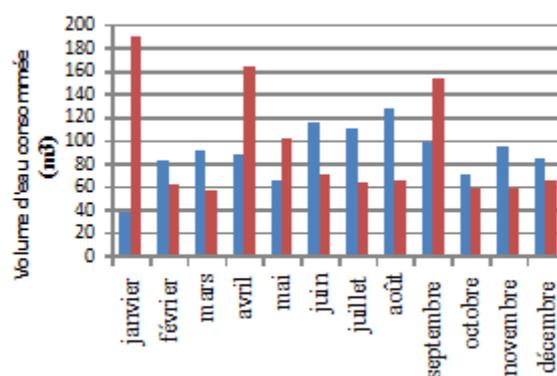


Figure 15 : Consommation d'eau de l'hôtel Mihaja Bis. En bleu : en 2011 ; en rouge : en 2012 (source : Hôtel Mihaja Bis, 2013)

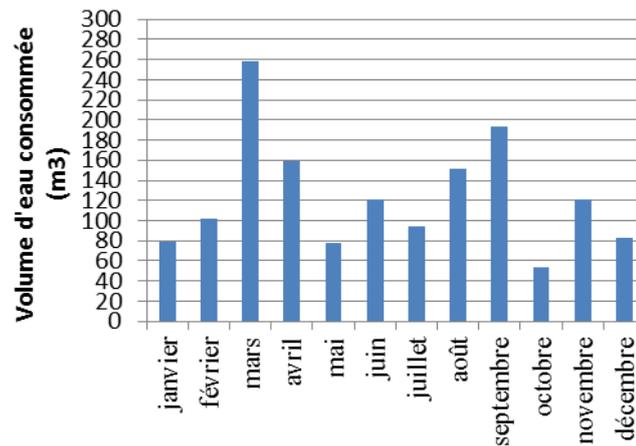


Figure 16 : Consommation d'eau de l'hotel Analamanga en 2012 (Source : Hôtel Analamanga, 2013)

III. 1. 6. 2 - Les sociétés à caractère industriel à Toliara

Les industries sont peu nombreuses dans la ville de Toliara et ses environs. Les industries à caractère industriel qui existent à Toliara sont :

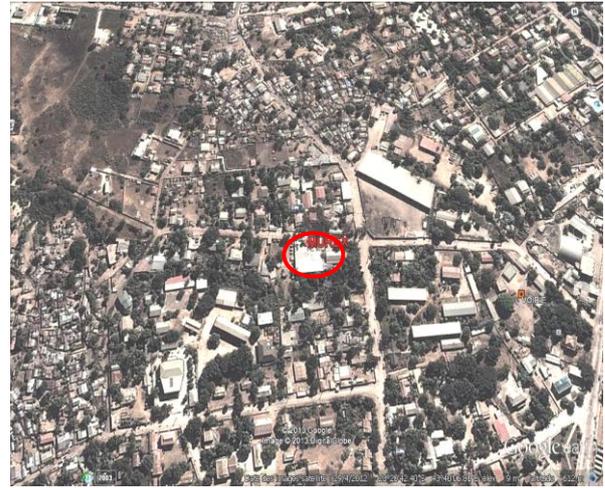
- les sociétés œuvrant dans les produits halieutiques : la COPEFRITO et le MUREX International ;
- la société industrielle de transformation des produits oléicoles : l'INDOSUMA.

III. 1. 6. 2. 1- Les sociétés œuvrant dans les produits halieutiques

Deux sociétés œuvrant dans le domaine halieutiques existent à Toliara : la COPEFRITO et le MUREX INTERNATIONAL. COPEFRITO se trouve au bord de la mer dans le quartier de Mahavatse II (figure 17a) et MUREX INTERNATIONAL se situe en pleine ville à Anketa (figure 17b).



17a



17b

Figures 17. 17a : Emplacement de la COPEFRITO dans la ville de Toliara. 17b : Emplacement de la société MUREX International dans la ville de Toliara (Source : Google earth, 2013)

Elles collectent le poulpe, crabe, calmar, langouste et poisson dans les villages côtiers le long du littoral de Toliara allant de Morombe à Androka. La quantité des produits collectés dépend de la marée. Le produit collecté atteint le maximum de tonnage à la période de vives eaux tandis que le minimum de quantité collectée est aux mortes eaux.

En moyenne 63% de ces produits sont des poulpes et nécessitent une quantité importante d'eau pour le rinçage de l'encre. Le rinçage des crabes avec les boues qu'elles contiennent demande aussi une grande quantité d'eau. La consommation en eau de l'usine est de l'ordre de 1 m³ pour 62 kg de produits traités.

Pour les sociétés commercialisant des produits halieutiques, l'eau est donc utilisée pour :

- le nettoyage et désinfection des matériaux et locaux,
- l'hygiène du personnel,
- le traitement des produits,
- la fabrication de la glace.

Plus de 50% de l'eau consommée est utilisée pour le traitement des produits collectés. Tous ces types d'usage de l'eau suscités sont les sources de l'eau usée de la COPEFRITO et MUREX.

Il faut noter qu'outre la fabrication de la glace, presque la totalité de la quantité d'eau utilisée par COPEFRITO et MUREX International est déversée dans les eaux usées par divers nettoyages. C'est pour cette raison que ces sociétés sont considérées comme des gros pollueurs. Par exemple, la société COPEFRITO aurait évacué 14 900 m³ d'eaux usées en 2010 (annexe 3). Ces quantités pourront augmenter car les produits collectés par l'usine ne cessent de s'accroître. Entre 2000 et 2004, le tonnage des céphalopodes traités (poulpes et calmars) a augmenté de plus

50%, passant de 330 tonnes à 510 tonnes (HARIDON, 2006). La quantité d'eaux usées évacuées dépend du tonnage des produits collectés.

Les eaux usées évacuées par les usines de pêche sont essentiellement composées de viscères de poissons, carapace de crabes et langoustes, encre de céphalopodes. Elles contiennent aussi des éléments chimiques provenant des produits utilisés pour les divers nettoyages et stérilisation comme l'emploi de chlore, détergents, etc. Les eaux de vannes s'ajoutent à ces effluents. Les effluents liquides évacués par la COPEFRITO ne respectent pas la norme (RAZAFINDRAVAO, 2010). Ces usines disposent un système de grille pour récupérer les matières solides amenées par les effluents qui peuvent obstruer les tuyaux d'évacuation. COPEFRITO a plusieurs bassins de décantation (figure 18) avant d'évacuer les effluents en mer (figure 19).

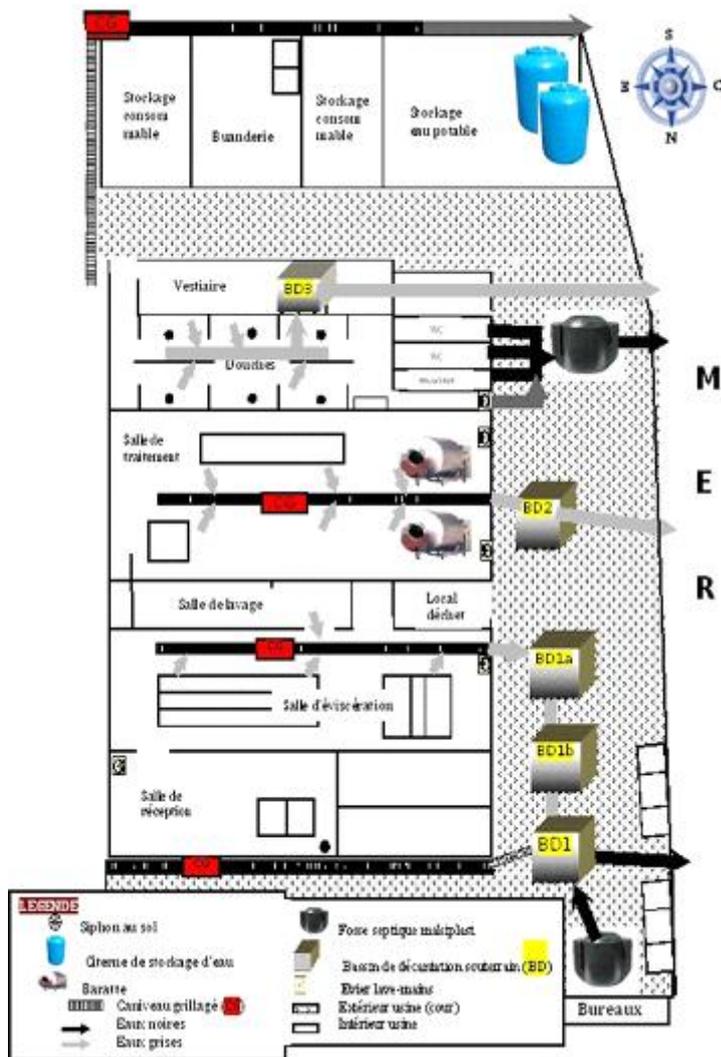


Figure 18 : Système d'évacuation d'eaux usées de Copefrito (Source : RAZAFINDRAVAO, 2010)



Figure 19 : Tuyau d'évacuation d'eau usée en mer de la Copefrito (RAJAONARIVELO, 2013)

Les eaux rejetées sont de couleur noire venant du traitement des céphalopodes. D'après la Direction de Copefrito, ces rejets seraient minimales par rapport aux déjections humaines dans la mer.

La société MUREX International aussi stocke les eaux usées dans des bassins à l'aide d'une motopompe dans un camion citerne de 5 m³ (figure 20) avant de les décharger à Ankoronga, village situé à 10 km avant Toliara sur la RN7. Huit voyages par jour en moyenne sont effectués.



Figure 20 : Pompage de l'eau usée de la MUREX pour transport à Ankoronga (RAJAONARIVELO, 2013)

III. 1. 6. 2. 2 - La société Indosuma (huilerie, savonnerie)

Indosuma se trouve à la périphérie de la ville de Toliara dans la commune rurale de Mitsinjo Betanimena, près du fokontany de Betania, loin de la mer (figure 21). C'est une société industrielle qui fabrique du savon et de l'huile. Il a aussi une unité d'égrainage de coton.



Figure 21 : Emplacement de l'INDOSUMA à Toliara (Google earth, 2013). En bleu : bassin de décantation des eaux usées.

Plus de 90% de l'eau utilisée par la société est de l'eau de puits, moins de 10% est de l'eau de la JIRAMA pour la raffinerie d'huile. Avant d'évacuer les eaux usées en milieu naturel, elles passent dans des bassins de décantation afin de récupérer les graisses flottantes pour le recyclage. D'après l'entretien avec le premier responsable, l'usine a un problème de gestion des eaux usées : l'insuffisance de traitement des effluents provoque un colmatage des tuyaux d'évacuation et la mauvaise odeur de l'eau rejetée.

La société est consciente de ce problème. Elle a, par exemple, un projet de culture de *Moringa oleifera* à Andranovory (à 60 km de Toliara) qui a pour but d'extraire l'huile des graines de cette espèce et d'utiliser les tourteaux dans le traitement des eaux usées de l'usine. Il y a un autre but qui est de partager la poudre de feuilles de moringa pour les élèves de la ville de Toliara comme complément alimentaire.

Les sociétés à caractère industriel installées à Toliara ne respectent pas les normes de rejet d'effluents dans le milieu naturel. Elles ont installé des bassins de décantation pour éviter le colmatage des tuyaux d'évacuation mais sont une source importante de la pollution, soit de la mer, soit des puits.

III. 1. 6. 3 - L'hôpital

Le centre hospitalier de Toliara paye mensuellement une facture correspondant à une consommation de 60 m³ d'eau. Il est difficile de définir la quantité exacte d'eau consommée par le centre car le compteur est enfoncé dans le sable et on ne peut pas faire de relevés.

En outre, le plan du système d'évacuation des eaux usées du centre hospitalier de Toliara est mal connu. Or, aucun système de traitement d'eaux usées n'y existe. Donc il se peut que tous les effluents s'infiltrent dans la nappe phréatique. En effet, compte tenu de la charge bactérienne et d'éléments chimiques de ce type d'eaux résiduaires l'eau souterraine est menacée de pollution.

III. 1. 6. 4 - Les causes des problèmes de gestion des eaux usées à Toliara

La baie de Toliara est un écosystème marin qui est exposée à différents types de pollution provenant de toutes sortes de rejets d'eaux usées résultant des activités de population tels que les eaux usées domestiques, déchets industriels provenant des unités de conditionnement de fruits de mer, les eaux usées des hôtels situés le long et à proximité de la plage (RASOAMANANTO, 2006). Une grande partie de l'ancien canal a été détruit à cause d'un mauvais entretien. En outre, il est obstrué par des ordures qui sont les premières causes de dysfonctionnement du système de gestion des eaux usées urbaines à Toliara ville. En effet, certaines personnes utilisent les égouts comme lieu de décharge des déchets solides (figure 22).

Des gens ont aussi l'habitude de jeter les déchets dans la rue ou hors du bac à ordures quand le ramassage par les services de la commune de Toliara n'est pas fait à temps (figure 23). Pendant la saison des pluies, tous ces déchets solides sont transportés par les eaux de ruissellement qui vont obstruer les égouts.

En outre, la ville est plate et à une altitude faible avec certains quartiers à un niveau plus bas que le niveau de la mer. La nappe phréatique est à une faible profondeur (1 m pour certains endroits). Ainsi, l'évacuation de l'eau pluviale est difficile et la ville est facilement inondée après les grosses pluies de la saison des pluies.



Figure 22 : un canal d'évacuation à Tsimenatse (RAJAONARIVELO, 2012)



Figure 23 : Des ordures non ramassées dans le centre de Toliara

Le système d'évacuation des eaux usées mis en place est de faible couverture, avec une longueur totale (canaux, caniveaux et buses) de 4 km (SOLPHI, 2011). Pour l'évacuation des eaux usées, le reste de la ville utilise des méthodes « de proximité » pour l'évacuation des eaux usées : l'eau grise s'infiltré dans la nappe phréatique et la pollue. Beaucoup de débris et déchets restent à la surface. Les problèmes de la commune urbaine de Toliara sur la gestion des eaux usées sont principalement :

- l'insuffisance du réseau d'assainissement,
- l'absence de l'application du plan d'urbanisme et donc du non respect du code de l'urbanisme et de l'habitat,
- une contrainte financière liée à la réalisation des programmes de développement urbain,
- pas d'implication de la population à la gestion des eaux usées,
- aucune installation de traitement des eaux usées.

III. 1. 6. 5 - Les conséquences de l'insuffisance de gestion des eaux usées

Les rejets d'eaux usées non traitées peuvent avoir des conséquences catastrophiques sur la qualité de l'eau. Les substances polluantes constituent une menace pour la faune et la flore aquatique. Les dégâts sur les plans sanitaires et écologiques subis par le milieu provoquent des répercussions sur l'économie et la vie sociale. L'excès des éléments chimiques comme le nitrate, phosphate, azote est favorable à la prolifération des microorganismes qui provoquent le phénomène d'eutrophisation perturbant la chaîne alimentaire. La baie de Toliara est un écosystème perturbé avec probablement une contamination de la chaîne alimentaire (RASOAMANANTO, 2008). Il y a un risque d'intoxication causée par la consommation des animaux marins et notamment des poissons comestibles (ICAM). À Toliara, le premier événement de l'ICAM était en 1956 (RAKOTOVAO, 2004). Des animaux filtreurs comme les oursins (*Echinometra mathaei*), indicateurs de la pollution de l'eau de mer, se développent dans le platier interne du grand récif de Toliara. Le littoral connaît une perte massive de couverture corallienne entre 1962 et 2011, allant de 39 à 79% selon les zones et s'établissant en moyenne à 65% (SCIENCES AU SUD, 2013). En effet, outre les pressions anthropiques que ce récif subit, le rejet des eaux usées non traitées dans la mer est sans doute l'un des facteurs qui dégradent cet écosystème.

La pollution fécale affecte aussi la qualité des eaux de baignade de la baie de Toliara. Il est donc urgent de trouver des solutions pour traiter les eaux usées avant de déverser dans le milieu naturel. La phytoépuration est la solution proposée pour résoudre ce problème.

III. 2 - Etude de la phytoépuration à Toliara

III. 2. 1- Aperçus de la phytoépuration

III. 2. 1. 1- Aperçus de la phytoépuration dans le monde

Les premières expériences avec des filtres plantés de macrophytes ont été faites au début des années 50 par un biologiste, SEIDEL. A partir d'une observation rigoureuse de la vie des plantes des marais et des marécages, elle mit en évidence l'activité biologique intense des zones d'interface, eau/terre, terre/air, etc. (RAKOTOARISOA, 2011).

Depuis, les principes de fonctionnement des bassins de lagunage à macrophytes flottants sont bien maîtrisés et les processus épuratoires modélisés dans les pays industrialisés (KONE, 2002). La réussite du lagunage dans les pays de l'Asie du Sud-Est (Thaïlande, Vietnam, Chine) et ceux de l'Amérique latine (Brésil, Colombie, Pérou) s'est faite par le biais de programmes internationaux de collaborations scientifiques avec les pays du Nord qui ont favorisé l'émergence d'équipes de chercheurs locaux qui développent des solutions adaptées à leurs situations (KONE, 2002). En Afrique de l'Ouest, les processus de fonctionnement des bassins de lagunage n'ont pas encore été suffisamment étudiés (KONE, 2002). Dans cette région, la ressource en eau est rare. Les questions relatives à la collecte des eaux usées et à leur traitement pour leur réutilisation sans risque dans le maraîchage et l'horticulture doivent être résolues (ENDA, 2000) pour lutter contre la pauvreté et le chômage (GERSTL, 2001). Le système d'assainissement par phytoépuration a déjà fait ses preuves dans certaines petites communes françaises depuis une vingtaine d'années. Il se révèle non seulement efficace, mais aussi esthétique.

III. 2. 1. 2- Aperçus de la phytoépuration à Madagascar

La première station de lagunage à Madagascar date de 1984 dans le campus de Vontovorona de l'université d'Antananarivo. Trois bassins ont été construits et implantés de laitue d'eau. On a ajouté un quatrième bassin en 1988. Mais quelques années plus tard le système d'épuration ne fonctionnait plus correctement faute d'entretien (RAKOTOARISON, 2008). Une étude sur la phytoépuration comme innovation a été effectuée dans ce campus en 2011 mais sa réalisation reste encore en attente (RAKOTOARISOA, 2011).

Des propositions de traitements des eaux usées urbaines par lagunage sont déjà avancées par des chercheurs mais le problème commun à Madagascar est lié à la collecte des effluents, au non-respect du plan d'urbanisme, au manque d'espace pour construire les bassins d'épuration.

Pour la ville de Toliara, des travaux ont suggéré des traitements biologiques pour l'épuration des eaux grises (RAKOTOARISON, 2008 ; SOLPHI, 2011).

III. 2. 2- Les plantes épuratrices à Toliara

Plusieurs espèces de plantes ont été recensées (figures 24 à 33) : *Colocasia esculenta* (taro ou saonjo), *Typha angustifolia* (vondro), *Cyperus alternifolius* (vinda), *Eichhornia crassipes* (jacinthe d'eau), *Nymphaea alba* (tatamo, voahirana), *Moringa oleifera* (ananambo), *M. drouhardii* (maroserana), *M. hildebrandtii* (maroserana), *Lepironia articulata* (vakoana) et *Typhonodorum lindleyanum* (viha).



Figure 24 : *Colocasia esculenta*



Figure 25 : *Typha angustifolia*



Figure 26 : *Cyperus alternifolius*



Figure 27 : *Eichhornia crassipes*



Figure 28 : *Nymphaea alba*



Figure 29 : *Moringa oleifera*



Figure 30 : *M. hildebrandtii*



Figure 31: *M. drouhardii*



Figure 32 : *Lepironia articulata*



Figure 33 : *Typhonodorum lindleyanum*
(Source : RAJAONARIVELO, 2012)

Les espèces *Colocasia esculenta* et *Cyperus alternifolius* sont cultivées pour leur usage : le premier est utile pour ses tubercules et feuilles comestibles et le deuxième pour la fabrication de panier, nattes. *Eichhornia crassipes* (Jacinthe d'eau) et *Nymphaea alba* (Grand nénuphar) sont des plantes décoratives. La jacinthe d'eau est moins cultivée à cause de sa multiplication qui entraîne rapidement une forte colonisation de l'espace dans ; elle couvre une grande surface dans les zones de déversement des effluents au bord de la mer, près du restaurant « Le Palétuvier », avec une surface de 1000 m² environ et à Tsimenatse III (près de 600 m²). La culture de nénuphar se trouve dans les bassins aménagés des bâtiments publics. *Moringa oleifera*, *M. drouhardii* et *M. hildebrandtii* ne sont pas des plantes aquatiques mais peuvent servir de plantes épuratrices. Elles sont cultivées à Toliara et ses environs. Dans la vallée du Nil, le moringa s'appelle « *Shagara Al Rauwaq* » ce qui signifie arbre qui purifie l'eau (CHANTREL et al., 1993)

III. 2. 3 - Choix des plantes épuratrices pour l'étude

Parmi les plantes aquatiques généralement utilisées pour l'épuration des eaux usées, la jacinthe d'eau tient une place de choix à cause de sa productivité et sa capacité physiologique à absorber rapidement et en grande quantité des polluants organiques et des métaux lourds (GARDEA-TORRESDEY et al., 2005). Elle est une réussite dans plusieurs stations d'épuration comme celle de Marrakech en 1986.

De nombreuses études révèlent la capacité de coagulation et de floculation de la poudre de graines de moringa (ANDZANATORA, 2006 ; HERIHANJANIAIVO, 2008). Pour un traitement à grande échelle des eaux, l'utilisation de cette technique pose des problèmes non seulement pour sa préparation mais aussi pour l'homogénéisation de la solution avec les effluents à traiter.

Un particulier, domicilié dans le quartier à Besakoa, dans la commune urbaine de Toliara utilise le tronc de *M. oleifera* comme floculant. Il l'a associé avec la culture de la jacinthe d'eau pour le traitement de ses effluents domestiques. Son expérience depuis quelques années nous incite à

mener prochainement une étude sur l'utilisation de la tige de cet arbre pour la purification de l'eau. Compte tenu de la contrainte d'espace disponible pour l'installation des bassins à phytoépuration dans une ville, la limite de l'efficacité du lagunage, les problèmes d'homogénéisation de la solution des eaux à traiter avec la poudre de la graine de moringa, l'emploi du tronc de cet arbre comme coagulant-floculant en amont des bassins à lagunage à macrophytes pourrait être avantageux.

C'est pour ces raisons que le choix des plantes épuratrices sera la jacinthe d'eau pour les petits bassins d'épuration et le lagunage par quartier et le *M. oleifera* ou *M. drouhardii* pour la clarification des eaux usées.

III. 2. 4 - Description des plantes épuratrices choisies

III. 2. 4. 1 - La jacinthe d'eau

III. 2. 4. 1. 1 - Origine et description botanique

La jacinthe d'eau, *Eichhornia crassipes* (famille Pontédériacée) est une plante monocotylédone aquatique envahissante originaire d'Amazonie, qui a été répandue par l'homme par le biais de l'horticulture dans les régions tropicales et subtropicales (GOPAL, 1987). Elle aurait été introduite à Madagascar vers 1900 comme plante ornementale dans la capitale Antananarivo (RANARIJAONA et al., 2013).



34a



34b

Figures 34 : Jacinthe d'eau avec ses rhizomes bulbeux servant de flotteurs (34a) et ses 8 à 15 fleurs en épi (34b) (RAJAONARIVELO, 2013)

La jacinthe d'eau est une herbacée vivace des rivières, canaux et lacs des régions tropicales et tempérées. Elle flotte à la surface de l'eau. Au-dessus de la surface de l'eau, chaque plante est formée de longues tiges stolonifères ramifiées prolongées par un rhizome constitué de nombreux nœuds (figure 34a). Grossièrement oviformes, les feuilles sont épaisses, cireuses, arrondies et lustrées se courbant sur les bords ondulés. Les veines des feuilles sont denses, nombreuses, en amende et longitudinales. Disposées en rosette, elles ont un pétiole de nature spongieuse. La racine de la jacinthe d'eau a une coloration généralement violette foncée, elle contient des pigments solubles, notamment des anthocyanines, qui vont la protéger de la prédation par des

animaux herbivores et du rayonnement solaire trop intense. Les hampes florales sont droites, mesurent environ 50 centimètres de long, et portent chacune de 8 à 15 fleurs colorées rassemblées en épi unique (figure 34b). Les fleurs ont six pétales, bleu violacé à lavande, le pétale du sommet montrant une tache jaune entourée d'un cercle bleu. Le fruit est une capsule fine enfermée dans un hypanthium aux parois épaisses formé à partir du périanthe. Chaque capsule peut contenir jusqu'à 450 graines d'une taille de 1 mm de large par 4 mm de long. Les graines peuvent rester viables jusqu'à 20 ans dans les sédiments.

III. 2. 4. 1. 2 - Les modes de reproduction

La jacinthe d'eau a deux modes de reproduction (GOPAL, 1987) :

- la reproduction sexuée qui se traduit par une production de graines en grande quantité mais dont la germination est fortement dépendante des conditions environnementales et
- la reproduction non sexuée par un potentiel élevé de multiplication végétative qui permet à la plante de produire un grand nombre d'individus dans un intervalle de temps relativement court (GOPAL, 1987).

Ces caractéristiques permettent à la plante de recouvrir les plans d'eau qu'elle colonise d'où son impact négatif sur la navigation, l'irrigation, la pêche et aussi sur la conservation de la diversité biologique car elle provoque la disparition de nombreuses espèces végétales et animales (HOLM et al., 1977).

III. 2. 4. 2 - *Moringa oleifera*

L'espèce *Moringa oleifera* est une dicotylédone de la famille de Moringacées originaire des versants sud de l'Himalaya en Inde. Elle est cultivée à Madagascar dans la zone côtière sous les noms vernaculaires suivants : « morongo », « hazomaroserana », « anamorongo », « ananambo », « felikambo », « felinimorongo ». A Toliara, elle est cultivée comme ombrières et haies vives pour clôturer et protéger des vents et à Mangily par l'ONG Bel Avenir pour produire des feuilles comme complément alimentaire dans des cantines scolaires (figure 35).



Figure 35 : *M. oleifera* en culture
à Mangily (Source : S. TOSTAIN, 2011)

Les écorces sont brunâtres à grisâtres, pâles, claires et grossièrement lenticellées. Ses feuilles sont tripennées à la base et bipennées au sommet avec 3 à 5 paires de foliolules ovales. Ses fleurs blanches et pédonculées de 4 à 10 cm, se développent en panicules axillaires, ramifiées ou terminales.



36a



36b



36c

Figures 36 : Feuilles (36a), inflorescences (36b) et détails des fleurs (36c) de *M. oleifera*
(Source : RAJAONARIVELO, 2013)

L'arbre peut fleurir et produire des gousses deux fois par an. Les fruits forment des gousses à trois lobes, mesurant entre 20 à 60 cm de long, qui pendent des branches. Lorsqu'ils sont secs, ils s'ouvrent en trois parties. Chaque gousse contient entre 12 à 35 graines qui sont de couleur noire rondes, avec une coque marron semi-perméable (figure 37c). La coque présente trois ailes blanches qui s'étendent de la base au sommet à 120 degrés d'intervalle. Un arbre peut produire 15 000 à 25 000 graines par an. Une amande pèse en moyenne 0,3 g et la coque représente 25% du poids de la graine.



37a



37b



37c

Figures 37 : Gousses (37a), graines dans une gousse (37b) et graine (37c) de *M. oleifera* (RAJAONARIVELO, 2013)

M. oleifera a la capacité de pousser rapidement à partir des graines ou des boutures, même dans les sols pauvres et marginaux. Elle demande peu d'attention en horticulture et s'adapte aux effets de la sécheresse prolongée et à une température supérieure à 48°C à l'ombre. L'espèce a une forte croissance à une température de 25 à 35°C avec une précipitation annuelle de 250 à 1500 mm, un sol argilo-sableux ou limono-sableux et à une altitude en dessous de 600 m. Dans ces conditions, sa croissance est de plus de 3 m par an.

III. 2. 5 - Test d'efficacité de traitement des eaux usées avec les plantes choisies

III. 2. 5. 1 - Les paramètres des eaux usées dans les sites d'étude

En analysant les données obtenues de quatre sites, on observe que la température des eaux usées étudiées, relevée à 11 heures, suit la norme (tableau 4). La conductivité des eaux usées du bassin du site d'un particulier à Besakoa est plus élevée par rapport aux deux autres sites. Cela veut dire que la minéralisation de ce site est supérieure aux autres puisque ses eaux sont riches en sel, c'est-à-dire riches en ions.

Tableau 4 : Mesures des paramètres étudiés dans les 4 sites sélectionnés (Source : RAJAONARIVELO, 2012)

Paramètres	Sites d'étude			
	Besakoa	Toliara centre	Tsimenatse	Besakoa(particulier)
Température (°C)	22,5	21,8	22,1	23,0
Conductivité (µS/cm)	31,4	48,2	38,5	60,4
pH	7,5	8,1	8,2	8,0
Oxygène dissous (mg/l)	2,1	1,5	0,8	3,6

Il se peut qu'un certain nombre des bactéries assurent cette minéralisation dans le bassin ou tout simplement la qualité des effluents n'est pas la même. Cependant, ces trois sites sont faiblement minéralisés en général. Les teneurs en oxygène dissous sont faible pour les trois sites. Elles ont une influence sur la valeur de la DBO et DCO de ces eaux.

En tenant compte de ces valeurs, on peut dire déjà que la qualité de ces eaux grises est médiocre.

III. 2. 5. 2 - Températures de l'eau dans le bassin couvert de jacinthes d'eau

La température de l'eau du bassin couvert de jacinthes d'eau est pratiquement constante ou change peu avec la variation de la température de l'atmosphère (figure 38). Ceci est dû à l'impact du couvert végétal se trouvant dans la cour du particulier qui constitue un écran limitant la pénétration du rayonnement solaire source de chaleur dans la profondeur du bassin.

C'est pour cette raison que la station d'épuration à jacinthe d'eau fonctionne même en hiver. D'autres exploitants utilisent aussi cette couverture comme une manière d'atténuer les émissions malodorantes qui peut être causées par le traitement du fait que les surfaces d'échanges entre l'air et les eaux usées diminuent.

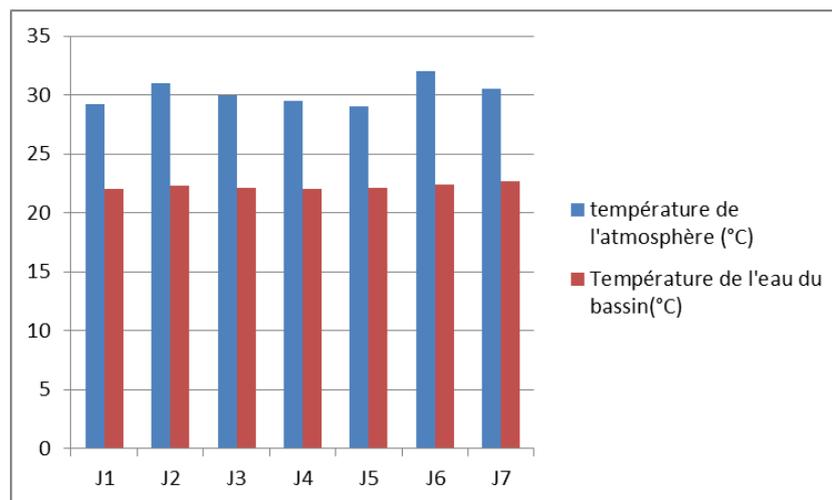
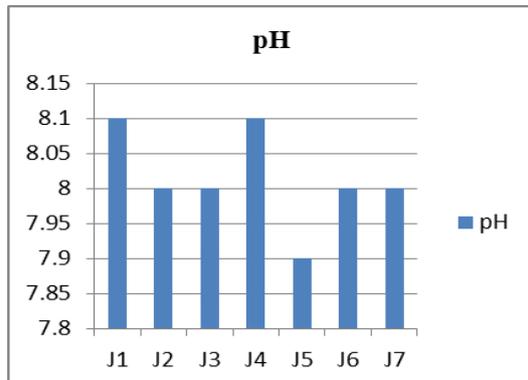


Figure 38 : Comparaison de la température de l'atmosphère avec la température de l'eau du bassin couvert de la jacinthe d'eau pendant 7 jours et à la même heure (RAJAONARIVELO, 2012)

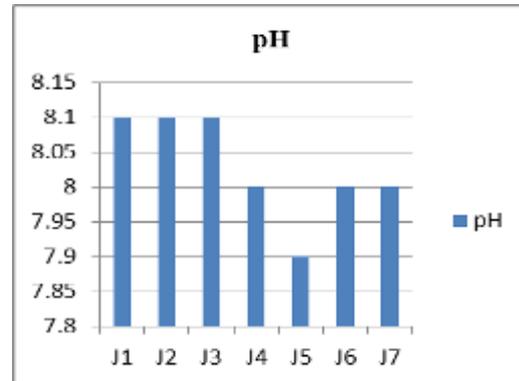
III. 2. 5. 3 - Qualité des eaux usées avec jacinthe d'eau et tige de Moringa

Les mesures de pH, de taux d'oxygène dissous et la conductivité vérifient avec le temps l'efficacité du traitement des eaux usées par la jacinthe d'eau et la tige de Moringa (figures 39, 40 et 41). La fonction filtre de la tige de moringa se manifestent sur les particules minérales et organiques responsables du trouble de l'eau. Le moringa contient une protéine soluble dans l'eau dont les propriétés floculantes permettent de clarifier l'eau de ses impuretés. Les matières en suspension dans l'eau s'agglomèrent alors et tombent au fond du récipient par gravité. L'eau

surnaissante est claire. Cette méthode est traditionnellement utilisée à l'échelle de la famille par certaines populations d'Afrique de l'Est et notamment au Soudan pour obtenir une eau de boisson.



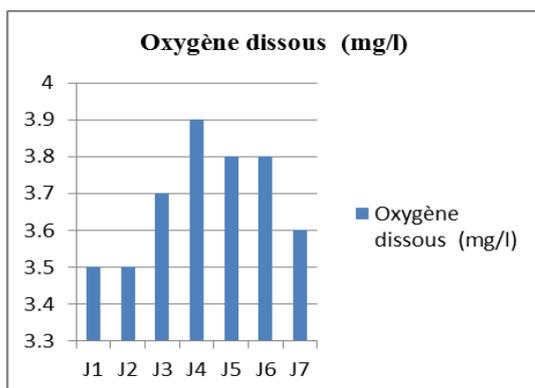
39a



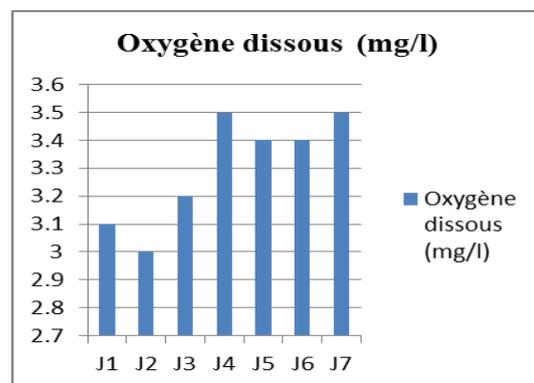
39b

Figures 39 : pH de l'eau avec l'implantation de la jacinthe d'eau (39a) et avec la tige de moringa (39b) (RAJAONARIVELO, 2012)

En général, la qualité de l'eau s'améliore de jours en jours. Ceci peut s'expliquer par l'accroissement progressif du nombre des bactéries ainsi que l'épuration évolutive de l'eau contenu dans les récipients. C'est pourquoi, un temps de rétention de l'eau dans le bassin d'épuration est nécessaire dans un traitement des effluents par lagunage.

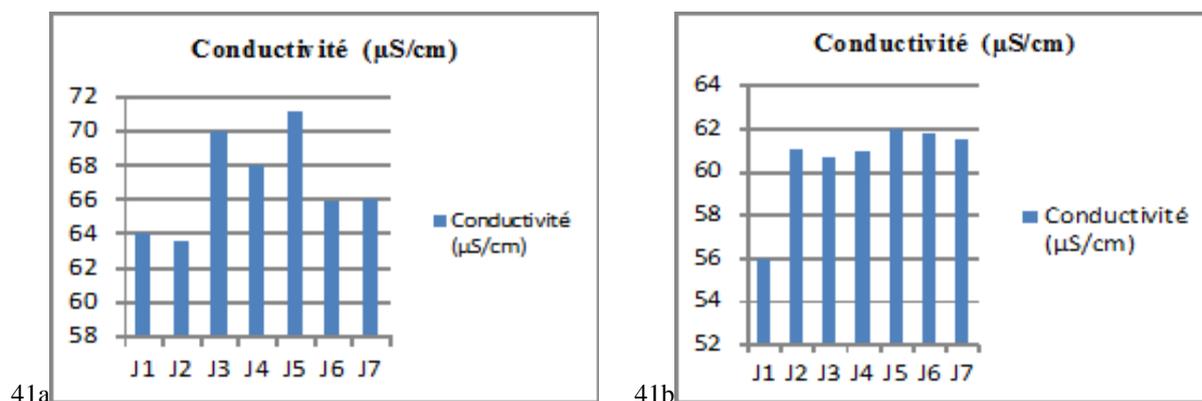


40a



40b

Figures 40 : Valeurs de l'oxygène dissous avec l'implantation de la jacinthe d'eau (40a) et avec l'introduction de la tige de moringa (40b) mesuré pendant 7 jours (RAJAONARIVELO, 2012)



Figures 41 : Valeurs de la conductivité avec l'implantation de la jacinthe d'eau (41a) et avec l'introduction de la tige de moringa (41b) (RAJAONARIVELO, 2012)

III. 2. 5. 4 - Mesure de la densité et de la biomasse de la jacinthe d'eau au bord de la mer

La densité moyenne de la jacinthe d'eau de l'étang à Besakoa (au bord de la mer) est de 179 pieds par m² (tableau 5). La moyenne du poids de la biomasse fraîche est de 46 kg/m² soit 460 tonnes/ha. Cette densité est supérieure à celle du parc urbain du Bangré-Weogo de la commune d'Ouagadougou au Burkina Faso (ALMOUSTAPHA, 2004). Cependant la valeur moyenne de la biomasse est inférieure, expliquée peut être par le fait que plus la population est dense plus le poids moyen des plantes a tendance à baisser (ENDA, 2000).

Tableau 5 : Nombre de pieds par m², la biomasse de la jacinthe d'eau au bord de la mer et le poids frais moyen d'un pied (RAJAONARIVELO, 2013)

Parcelles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de pieds	183	201	151	197	178	146	213	191	155	177
Poids frais (kg)	57,3	62,8	53,2	61,7	56,8	50,8	66,6	61,4	52,7	57,4
Poids frais moyen	0,31	0,31	0,35	0,31	0,32	0,35	0,31	0,32	0,34	0,31

III. 2. 5. 5 - Suivi de la croissance de la jacinthe d'eau suivant les saisons

Vers la fin du 19^e siècle, des études faites sur sa croissance révèlent que la jacinthe d'eau trouve ses meilleures conditions de développement dans les pays tropicaux où la température est favorable à son développement. L'amplitude thermique de l'eau est restée faible pendant la période d'étude malgré des nuits fraîches pendant l'hiver austral (de mai à fin juillet). La densité de la jacinthe d'eau dans le bassin n'a pas été affectée par la température (tableau 6). L'évolution de la biomasse est légèrement plus faible en saison froide.

Tableau 6 : Régénération expérimentale de la jacinthe d'eau dans le bassin pendant les trois saisons (par quinzaine). Température moyenne diurne et nocturne (RAJAONARIVELO, 2013)

Mois de la période froide	mai		juin		juillet	
nombre de pieds	4	9	31	65	93	197
MF (kg)	0,6	2,8	8,5	18,0	35,0	51,0
Température moyenne (°C)	21,0	19,0	20,1	19,2	20,0	22,0
Mois de la période chaude	août		septembre		octobre	
nombre de pieds	4	11	36	79	113	216
MF (kg)	0,6	3,5	12,0	31,0	49,0	68,0
Température moyenne (°C)	23,0	22,5	24,1	24,0	26,0	25,2
Mois de la période chaude et pluvieuse	novembre		décembre		janvier	
nombre de pieds	4	16	41	82	120	221
MF (kg)	0,6	3,1	10,5	27,0	51,0	71,0
Température moyenne (°C)	24,0	26,1	25,7	24,2	25,0	24,9

Les températures moyennes relativement basses diminuent l'activité de l'enzyme superoxyde dismutase (SOD) dont le rôle est important dans le métabolisme de la jacinthe (LI et al., 1995 ; ALMOUSTAPHA et al., 2004). Les plantes sont plus chétives en saisons froides. Une légère diminution du rendement épuratoire peut être constatée en cette période.

III. 3 - Discussions

III. 3. 1- traitement des eaux usées par la jacinthe d'eau

Des chercheurs américains, français, africains et malgaches ont, à partir de 1978, découvert des propriétés inattendues de la jacinthe d'eau dont sa forte capacité de rétention de minéraux et d'éléments nutritifs. La quantité d'ions absorbés par la jacinthe d'eau est de l'ordre de 28% de la matière sèche (WOLVERTON et al., 1979). Ils proviennent essentiellement de métaux toxiques comme le plomb, le nickel, le mercure et le cadmium.

Un essai d'épuration des eaux usées de Marrakech par la jacinthe d'eau montre une nette diminution de la charge organique, bactérienne et parasitologique de l'eau traitée après un temps de rétention de 7 jours dans des bassins à deux étages (MANDI et al., 1992). Les mécanismes bactéricides de la plante sont encore mal connus mais ces auteurs ont fait les hypothèses suivantes

- le système racinaire de la jacinthe d'eau lui permet de piéger les microorganismes en suspension,
- les bactéries se fixent sur la plante et tombent au fond du bassin,
- la plante émet des substances bactéricides.

La jacinthe d'eau peut être utilisée pour aider le processus de purification de l'eau soit pour l'eau potable ou les effluents liquides des systèmes d'égouts. Dans une usine de traitement de l'eau potable la jacinthe d'eau a été utilisée dans le cadre de l'étape de prétraitement de purification. Des plantes propres, en bonne santé ont été incorporées dans l'eau grise des clarificateurs. Ces plantes ont aidé à l'élimination des petits flocons qui restent en suspension après l'étape de coagulation et de floculation. Le résultat est une diminution significative de la turbidité due à l'élimination des flocons et aussi la réduction de la matière organique dans l'eau.

La jacinthe d'eau serait devenue une menace non négligeable pour les zones humides de Madagascar, en particulier le lac Alaotra, le canal de Pangalanes à l'est, le lac Ravelobe dans le parc national d'Ankarafantsika. En 2007, le coût d'éradication de la jacinthe au lac Ravelobe était de 2 491 000 Ariary (RANARIJAONA et al., 2013) mais les plantes persistent encore. L'arrachage de ces plantes pose des problèmes. Il apparaît que la technique d'arrachage manuel n'est pas conçue pour l'ampleur de la colonisation de la jacinthe. Une des techniques après arrachage employée pour lutter contre la prolifération des plantes est le brûlage des plantes après séchage ou l'enfouissement à proximité des milieux aquatiques, mais elles apparaissent discutables dans un contexte de gestion de l'environnement tourné vers la réduction des impacts des interventions. L'emploi des herbicides n'est pas conseillé pour la conservation de la biodiversité. En Afrique du Sud, en Ouganda et en Nouvelle-Guinée, la lutte biologique existe

grâce aux insectes *Neochetina eichhorniae* et *N. bruchi*. Elle est efficace surtout quand le milieu est large et soumis au vent. Cependant, son application à Madagascar et l'introduction des espèces anti-jacinthe exigent des recherches complémentaires *in situ* afin qu'il n'y ait pas d'autres impacts environnementaux.

La valorisation de la jacinthe d'eau n'existe pas encore à Madagascar outre l'alimentation de bétail dans quelques régions mais elle mérite d'être étudiée.

III. 3. 2 - Traitements des eaux usées par le moringa

III. 3. 2. 1 - Utilisation des graines

D'habitude, pour le traitement de l'eau, on utilise les graines de moringa. Un tourteau obtenu après extraction de l'huile serait efficace pour des traitements à grande échelle (ce qui ne semble pas poser de problème à l'échelle domestique). La qualité protéique, donc l'efficacité flocculante, peut varier en fonction des techniques d'extraction de l'huile (FOLKARD, 1997). Le flocculant contenu dans les graines ou les tourteaux est un polypeptide basique, plus précisément un ensemble de polyélectrolytes cationiques actifs. Ces polyélectrolytes de charge positive neutralisent les colloïdes des eaux troubles car la majorité de ces colloïdes ont une charge négative. Dans le tourteau de Moringa, il y a un coagulant qui provoque la formation de ponts entre les colloïdes (FOIDL et al., 2002). Le polyélectrolyte cationique réagit préférentiellement avec la matière organique. Les doses requises varient donc en fonction du taux de matière organique présent dans l'eau (FOLKARD, 1997)

Le traitement des eaux par de la farine de graines de moringa montre qu'elle agit comme un flocculant dans l'eau (CHANTREL et al., 1993). Ces chercheurs ont observé aussi la diminution du taux de bactéries, notamment les coliformes totaux et fécaux ainsi que les streptocoques fécaux qui ne sont parfois même plus identifiés dans l'eau traitée. Cette recherche a permis de dire que le moringa abaisse la turbidité des eaux fortement turbides mais pas les eaux peu turbides (il serait plus efficace pour le traitement des eaux usées que pour l'eau de boisson potable). Cependant, la désinfection demande des dosages très élevés.

III. 3. 2. 1. 1- Avantage de l'utilisation des graines dans le traitement des eaux usées

L'intérêt d'utiliser le *Moringa* est de diminuer les coûts dus à la consommation d'alun toxique (JAHN, 1999 in CHANTREL et al., 1993). L'utilisation des coagulants industriels toxiques et coûteux nécessite du personnel qualifié, ce qui n'est pas toujours facile et engendre des risques.

III. 3. 2. 1. 2 - Inconvénients de l'utilisation des graines dans le traitement des eaux usées

Il y a des inconvénients à l'utilisation de poudres de graines :

- La solution mère est difficile à préparer à partir de la poudre brute, un délayage de la poudre avant introduction dans l'eau claire est nécessaire.
- La solution mère présente des problèmes d'homogénéité.
- La décantation dynamique est difficile et incomplète sans doute à cause de la faible densité des particules de Moringa.
- Du chlore combiné se forme si la filtration n'est pas parfaite car il reste alors des matières organiques, notamment des particules de Moringa.
- Les graines de *Moringa oleifera* introduisent des matières organiques dans l'eau (FATOMBI et al., 2009)
- Les doses requises pour observer un effet stérilisant ne sont pas réalistes dans le cadre du traitement de l'eau, car elles impliquent un apport beaucoup trop important de molécule bactéricide.

Comparé aux flocculants chimiques

- Des doses 4 à 5 fois plus importantes.
- Un stockage et une conservation de la poudre des graines souvent difficiles.

III. 3. 2. 2 - Utilisation de la tige

Cette étude montre que le tronc de moringa agit sur le traitement de l'eau. Il se peut que cette partie de la plante a des polypeptides qui sont des agents purificateurs d'eau comme ceux des graines. Un des objectifs de la floculation est de diminuer fortement le taux de germes car une grande majorité est éliminée avec les matières en suspension, lorsque celles-ci précipitent et sont séparées de l'eau claire. La baisse de turbidité constitue donc une purification partielle. Des expériences montrent que les feuilles de cet arbre peuvent abaisser la turbidité d'une eau de puits trouble (JAHN, 1989 in CHANTREL et al., 1993). Il semble que toute la partie de la plante ait un pouvoir de purifier l'eau.

L'intérêt est donc de constituer une alternative aux produits chimiques actuellement utilisés.

III. 3. 2. 2. 1 - Avantages de l'utilisation de la tige

Il y a des avantages à utiliser des tiges :

- L'utilisation du tronc de moringa résout le problème d'homogénéisation dans l'emploi de la poudre de graines.
- La régénération de la plante est plus rapide après la taille de la plante. La coupe de l'arbre peut améliorer la production de feuilles qui sont utilisées pour l'alimentation.
- L'emploi du tronc de cet arbre ne nécessite pas beaucoup de préparation.
- Le tronc peut rester plus longtemps dans le bassin, ce qui ne demande pas trop de travail.

III. 3. 2. 2 - Inconvénients de l'utilisation de la tige de moringa

L'utilisation de cette partie de l'arbre du moringa dans le traitement des eaux usées n'est pas encore bien étudiée. Le mode d'utilisation de cette technique n'existe pas encore jusqu'à ce jours.

III. 3. 3 - Etude d'une conception d'une station d'épuration à Toliara

III. 3. 3. 1 - Types du lagunage choisi

Le type d'épuration choisi est le lagunage à macrophytes d'*Eichhornia crassipes* après une coagulation-floculation par la tige de *Moringa oleifera* dans un bassin à décantation. L'utilisation du moringa permet une diminution de la surface de la station par rapport au lagunage à macrophytes seuls.

III. 3. 3. 2 - Choix du site à épurer et dimensionnement des bassins

Pour le dimensionnement des bassins, il faut tenir compte de la croissance démographique pour que la station soit exploitable à long terme et qu'il y ait une surface nécessaire par équivalent habitant. Cette surface va diminuer avec l'utilisation du moringa. Dans une station d'épuration à macrophytes la surface totale de lagune est 2 à 2,5 m²/ habitant dont :

- 1^{er} étage (constitué de 3 lits en parallèle) : 1,2 à 1,5 m²/habitant ;
- 2^{ème} étage (constitué de 2 lits en parallèle) : 0,8 à 1 m²/habitant.

Des idées de création de cuvettes de récupérations des eaux usées de la ville de Toliara à Amborogony, Tanambao et Mahavatse existent mais ne sont pas encore réalisées (RAJAONA et al., 2003).

Tableau 7 : Simulation de dimensionnement d'une station de lagunage par fokontany de la ville de Toliara. Arrond. = Arrondissement ; EH = Équivalent Habitant (RAJAONARIVELO, 2013)

Arrond.	Fokontany	Année 2012			Année 2017		
		Nbre hab. x1000	Surface des bassins		Nbre hab. x1000	Surface des bassins	
			0,6m ² /EH x1000	0,3m ² /EH x1000		0,6m ² /EH x1000	0,3m ² /EH x1000
Besakoa	Ambohitsabo	5,5	3,3	1,6	6,2	3,7	1,9
	Anketa Ambony	2,7	1,6	0,8	3,0	1,8	0,9
	Anketa Ambany	5,1	3,0	1,5	5,7	3,4	1,7
	Betaritarika	4,4	2,6	1,3	4,9	2,9	1,5
	Tsianaloka	5,2	3,1	1,6	5,9	3,5	1,8
	Antaninarenina	4,9	2,9	1,4	5,4	3,3	1,6
	Anketraka	2,5	1,5	0,7	2,8	1,7	0,8
	Tsongobory	1,9	1,1	0,6	2,1	1,3	0,6
	Besakoa	4,2	2,5	1,3	4,7	2,8	1,4
Sakabera	1,9	1,1	0,6	2,1	1,2	0,6	
Betania	Andaboly	6,9	4,1	2,7	7,7	4,6	2,3
	Betania Est	5,2	3,1	1,6	5,8	3,5	1,7
	Ankilifaly	2,8	1,7	0,8	3,2	1,9	0,9
	Betania Tanambao	8,8	5,3	2,6	9,8	5,9	2,9
	Mangabe	2,6	1,6	0,8	2,9	1,8	0,9
Mahavatse I	Betania Ouest	3,5	2,1	1	4,0	2,4	1,2
	Ankiembe Haut	4,4	2,6	1,3	4,9	2,9	1,5
	Mahavatse I Est	8,8	5,3	2,6	9,9	5,9	3
	Mahavatse I Ouest	7,5	4,5	2,3	8,4	5,1	2,5
Mahavatse II	Ankiembe Bas	5,2	3,1	1,6	5,8	3,5	1,7
	Mahavatse Tanambao	8,1	4,9	2,4	9,1	5,4	2,7
	Motombe	9,8	5,9	3	11,0	6,6	3,3
	Mahavatse II Est	5,9	3,6	1,8	6,6	4	2
	Mahavatse II Ouest	5,6	3,4	1,7	6,3	3,8	1,9
	Tsimenatse I Est	5,9	3,6	1,8	6,6	4	2
	Tsimenatse I Ouest	4,1	2,5	1,2	4,6	2,8	1,4
	Tsimenatse II	6,1	3,7	1,9	6,9	4,1	2,1
Tsimenatse III	3,3	2,0	1	3,7	2,2	1,1	
Tanambao I	Tsenengea	8,5	5,1	2,5	9,5	5,7	2,9
	Tanambao I	5,1	3,1	1,5	5,7	3,4	1,7
	Tanambao Morafeno	7,6	4,6	2,3	8,5	5,1	2,6
	Toliara centre	6,3	3,8	1,9	7,1	4,2	2,1
Tanambao II	Amborogony	7,2	4,3	2,2	8,1	4,8	2,4
	Tanambao Amborogony	6,5	3,9	2	7,3	4,4	2,2
	Tanambao II TSF Nord	6,0	3,6	1,9	6,7	4	2
	Andabizy	3,9	2,3	1,2	4,4	2,6	1,3
	Konkasera	2,7	1,6	0,9	3,1	1,8	0,9
	Ankatsaka TSF Sud	4,9	2,9	1,5	5,4	3,3	1,6
	Ampasikibo	7,5	4,5	2,2	8,4	5	2,5
	Sanfily	4,6	2,8	1,4	5,2	3,1	1,7

Des simulations ont été faites sur le dimensionnement des bassins en vue du traitement des effluents domestiques des fokontany de la ville de Toliara suivant le nombre de la population et le taux de croissance démographique ont été faites (tableau 7). Un intervalle de 5 ans (2013-2018) a été adopté avec une supposition de la réduction des surfaces nécessaires de 0,6 et 0,3 m²/habitant.

La population dans les fokontany dépasse 2 000 habitants sauf dans ceux de Tsongobory et Sakabera qui sont des quartiers périphériques de la ville. Donc la technique d'épuration des effluents domestiques par lagunage habituel peut s'installer dans ces endroits de 2000 habitants au maximum. En tenant compte de la croissance démographique, d'ici à cinq ans, le rendement épuratoire de ces installations ne sera plus adéquat car la population dépassera la limite. La réduction de la surface des bassins en ajoutant du *Moringa oleifera* sera nécessaire pour toute la ville.

L'installation doit tenir compte des surfaces, des digues et des canaux d'irrigation.

III. 3. 3. 3 - Lieu de prélèvement des plantes épuratrices

Le prélèvement d'*E. crassipes* ne pose pas de problème. Une superficie de plus de 2 000 m² est disponible dans la ville de Toliara. Il suffit de transporter des échantillons vers la station d'épuration choisie.

Ce sera plus difficile pour l'espèce *M. oleifera*. Il y a une grande plantation de l'ONG Bel Avenir (4 ha à Mangily) qui est utilisée pour donner un complément alimentaire aux enfants des écoles de Toliara. Il est difficile de l'utiliser pour une station d'épuration collective. Néanmoins, sur le plateau Mahafaly il y a beaucoup de plantes de l'espèce endémique *M. drouhardii*. Avec l'autorisation du service des eaux et forêts, il est envisageable d'y prélever des boutures et des fruits pour le premier démarrage de l'épuration. Mais il faut rappeler que l'emploi de la tige des espèces de moringa dans le traitement des effluents nécessite encore un travail de recherche. Il est conseillé de cultiver à grande échelle cette espèce pour qu'on puisse l'exploiter pour la recherche et le traitement des eaux si les résultats de la recherche sont positifs.

III. 3. 3. 4 - Schéma de la station d'épuration proposée

Pour chacun des Fokontany, nous proposons un schéma pour une station d'épuration (figure 42).

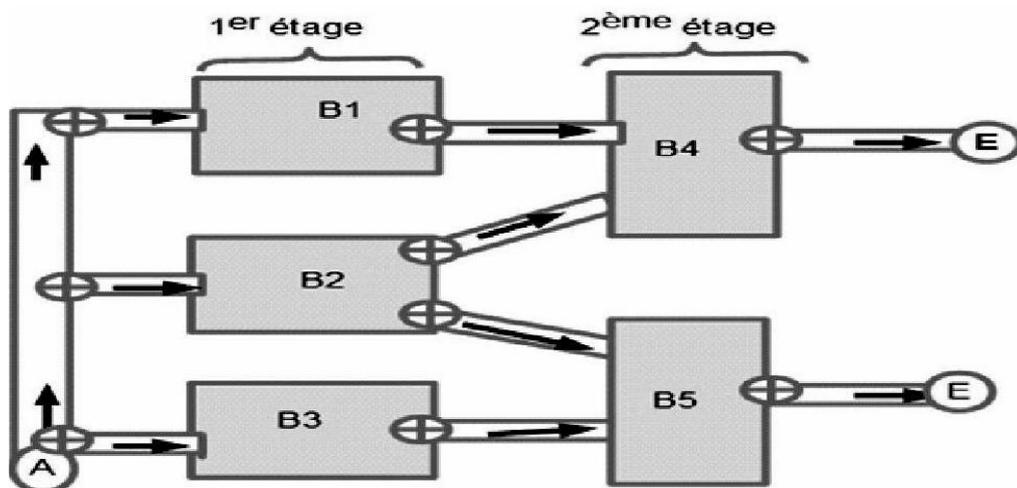


Figure 42 : Schéma d'un projet de station d'épuration ; A : Arrivée des eaux grises à traiter ; E : Évacuation des eaux traitées ; B : Bassins.

Légendes : + Régulation de l'entrée et de la sortie de l'eau ; → : Sens d'écoulement de l'eau. (RAJAONARIVELO, 2013)

Les trois premiers bassins du premier étage servent des bassins de décantation avec l'introduction des tiges de *M. oleifera* et les deux autres sont cultivés de *E. crassipes*. Les surfaces des bassins B1, B2 et B3 du premier étage seraient de 0,18 m² par habitant et de 0,12 m² par habitant pour les bassins B4 et B5 du deuxième étage.

III. 3. 3. 5 - Coût d'installation des stations

Le traitement des eaux usées domestiques par la phytoépuration est facile à mettre en place du point de vue technique et d'un faible coût (tableau 8). Les travaux à faire sont principalement :

- Le débroussaillage et le terrassement du terrain.
- Le creusement des bassins et des canaux d'irrigation.
- L'aménagement du fond des bassins et des canaux de circulation de l'eau en apportant de l'argile pour l'imperméabiliser.
- La construction en graviers des périmètres des bassins et canaux.
- La taille et le transport du moringa
- Le prélèvement, le transport, le rinçage et la culture de la jacinthe d'eau.
- La clôture de la station, nécessaire pour éviter toute entrée et contact avec les eaux polluées des bassins.

Le quartier de Tsimenatse II (6100 habitants) a été pris pour exemple avec un dimensionnement des bassins exploitables en cinq ans et une surface nécessaire de 0,3 m²/habitant (tableau 8). La surface nécessaire est environ de 2 000 m² c'est-à-dire 5 bassins d'environ 400 m². Le prix du terrain est exclu de ce calcul du coût. On arrive à plus de 5 millions d'Ariary (500 Ar par habitant par an).

Tableau 8 : Coût estimatif d'une installation d'une station d'épuration à Tsimenatse II. Fft : forfait (RAJAONARIVELO, 2013).

Désignations	Unité	Quantité	Prix unitaire (Ar)	Montant (Ar)
Débroussaillage	forfait	1	100 000	100 000
Terrassement	forfait	1	300 000	300 000
Achat argile et transport	m ³	15	40 000	600 000
Achat sable et transport	charrette	120	4000	480 000
Achat ciment et transport	sacs	40	24 000	960 000
Achat graviers et transport	charrette	200	6000	1 200 000
Découpage et transport de moringa	forfait	1	200 000	200 000
Prélèvement, transport, rinçage et culture de la jacinthe d'eau	forfait	1	150 000	150 000
Achat et conception matériel pour le dégrillage et tamisage	forfait	1	100 000	100 000
Main d'œuvre	bassin	5	400 000	2 000 000
Achat eau et transport	forfait	1	80 000	80 000
Total (en Ariary)				5 170 000

III. 3. 4 - Avantages du choix des plantes

L'emploi en simultané de ces deux espèces réduirait la surface nécessaire et le temps de rétention pour le traitement. Elles présentent d'autres avantages.

III. 3. 4. 1 - La jacinthe d'eau

Bien que la jacinthe d'eau soit considérée dans de nombreux pays comme une mauvaise herbe, de nombreux individus, groupes et institutions ont été en mesure de trouver des applications utiles pour la plante. Bien que composée de plus de 95% d'eau, la plante est riche en tissus

fibreuse et en protéines utilisables pour une variété d'applications utiles. Certaines ont été mises au point et d'autres sont encore à leurs débuts ou au stade d'idée :

- *production de papier* : au Bangladesh, deux projets font du papier à partir des tiges de la jacinthe d'eau. Les fibres sont mélangées avec les déchets de papier ou de jute. Le résultat est économiquement bon.

- *Panneaux de fibres* : le Building Research Institute de Dakar (Sénégal) a réalisé un travail expérimental sur la production de panneaux de fibres à partir de la jacinthe d'eau. Les tiges hachées sont réduites par ébullition, puis lavées et battues. La pâte est blanchie et les déchets mélangés avec de la pâte à papier, un agent de filtrage, tels que le kaolin. Les panneaux d'isolation sont formés dans un cadre, puis finis dans une presse à bras et suspendus pour sécher. Les propriétés physiques du panneau sont suffisamment bonnes pour l'utilisation à l'intérieur des cloisons et des plafonds. Les enquêtes sur l'utilisation de panneaux enduits de bitume pour la toiture sont en cours.

- *Fils et cordes* : la fibre de la tige de jacinthe d'eau peut être utilisée pour faire des cordes. La tige est déchiquetée pour mettre les fibres dans le sens de la longueur, puis on laisse sécher pendant plusieurs jours. Le processus de fabrication de la corde est similaire à celui de la corde de jute. La corde finie est traitée avec du métabisulfite de sodium pour l'empêcher de pourrir. Au Bangladesh, la corde est utilisée par un fabricant de meubles pour le cannage.

- *Vannerie, Paniers et nattes* : aux Philippines, la jacinthe d'eau est séchée et utilisée pour faire des paniers et des nattes à usages domestiques. La clé d'un bon produit est de veiller à ce que les tiges soient bien sèches avant d'être utilisées. Si les tiges contiennent encore de l'humidité, cela peut amener le produit à pourrir très rapidement. En Inde, la jacinthe d'eau est également utilisée pour produire des vanneries destinées à l'industrie touristique.

- *Briquettes de charbon* : C'est une idée qui a été proposée au Kenya pour faire face à l'expansion rapide du tapis de jacinthes d'eau sur de nombreuses parties du lac Victoria. La proposition est de développer la fabrication de briquettes de charbon à partir de la poussière provenant de la pyrolyse de la jacinthe d'eau. Le projet est encore au stade de l'idée et une étude socio-économique est prévue pour évaluer les techniques et les perspectives d'un tel projet.

- *Production de biogaz* : la possibilité de convertir la jacinthe d'eau en biogaz est un domaine d'intérêt majeur depuis de nombreuses années. Le produit est du gaz méthane qui peut être utilisé comme combustible pour la cuisine, l'éclairage ou pour alimenter un moteur. Le résidu de la digestion fournit un engrais riche en nutriments.

- *fourrages pour animaux* : des études ont montré que des éléments nutritifs sont disponibles dans la jacinthe pour les ruminants. En Asie du Sud-Est, certains animaux sont

nourris de rations contenant de la jacinthe d'eau. En Chine, les éleveurs de porc hachent et font bouillir la jacinthe d'eau avec des déchets de légumes, et de sel. Cependant ; il faut noter que sa haute teneur en minéraux n'est pas adaptée à tous les animaux.

- *Engrais* : la jacinthe d'eau peut être utilisée sur la terre soit comme un engrais vert ou comme compost. Au Sri Lanka, la jacinthe d'eau est mélangée avec les déchets municipaux organiques et des cendres, le mélange est composté et vendu à des agriculteurs locaux et les maraîchers.

III. 3. 4. 2 - *Moringa oleifera* ou Ananambo

L'Ananambo est aussi un arbre utile à l'alimentation humaine et animale.

- *Alimentation humaine*

Tous ses organes sont utilisables :

- Fruits : à l'état jeune, les fruits de *M. oleifera* peuvent se préparer et se consommer comme les haricots verts.

- Graines : Les graines de *M. oleifera* contiennent de l'huile comestible. Elles peuvent être cuites et mangées comme celles de maïs ou d'arachides.

- Feuilles : Les feuilles de *M. oleifera* sont un légume de bonne qualité nutritionnelle. Elles sont riches en protéines, vitamines et certains minéraux. Elles sont riches en acides aminés et acides gras essentiels. Si l'on compare les feuilles de Moringa avec d'autres légumes, elles sont beaucoup plus nutritives que les légumes « fruits » (concombre, tomates...). En équivalent de poids, les feuilles fraîches contiennent 7 fois plus de vitamine C que les oranges, 4 fois plus de vitamine A que les carottes, 4 fois plus de calcium que le lait, 3 fois plus de potassium que les bananes et 3 fois plus de fer que les épinards (PALETTE, 1999). Les feuilles de Moringa peuvent se consommer fraîches dans des plats en sauce, ou bien sous forme sèche (réduite en poudre) laquelle peut être ajoutée aux plats en sauce, aux gâteaux et beignets, aux farines infantiles (en complément alimentaire). Une consommation régulière de ces feuilles, associées à d'autres aliments, aide à rester en bonne santé. L'utilisation de la poudre de ces feuilles est particulièrement préconisée chez les enfants souffrant de malnutrition, ou pour prévenir l'apparition de malnutrition. On peut faire la comparaison des compositions nutritionnelles de la spiruline en poudre et des feuilles de *M. oleifera* en poudre pour quelques éléments (tableau 9).

Tableau 9 : Comparaison des compositions nutritionnelles de la spiruline en poudre et des feuilles de *M. oleifera* en poudre pour quelques éléments et pour 100 grammes de poudre (Source : PALETTE, 1999).

Eléments	<i>Spirulina platensis</i>	<i>Moringa oleifera</i>
Humidité	3%	7%
Protéines digestibles	40	23
Potassium (mg)	1400	1200
Calcium (mg)	700	1950
Phosphore (mg)	800	290
Magnésium (mg)	400	380
Fer (mg)	100	25
Vitamine A (UI)	23000	13795
Vitamine C (mg)	0	790

Ce tableau montre que la spiruline et les feuilles de moringa sont des aliments riches en éléments minéraux. Leurs utilisations comme compléments alimentaires sont conseillées. Le moringa contient de deux fois plus de calcium que la spiruline.

D'après les enquêtes, seulement 5% de la population de cette ville consommerait des feuilles de moringa. Ce faible pourcentage est dû à l'ignorance aux valeurs nutritives de l'espèce. La fréquence moyenne de la consommation est moins d'une fois par mois. Ces feuilles sont préparées dans un bouillon (*ro mazava*) ou accompagnent la viande de bœuf. L'utilisation de cette espèce dans le traitement des eaux usées peut favoriser la consommation de moringa et aider la population de la région sud ouest à lutter contre la malnutrition.

III. 3. 5 - Importance de la mise en place d'une station d'épuration

L'installation des stations de traitement des eaux usées à Toliara présente de nombreux avantages pour l'environnement, la santé des populations et l'économie de la ville.

III. 3. 5. 1 - Avantages environnementaux

Les avantages sont principalement :

- La réduction de nuisance olfactive créée par la stagnation des effluents domestiques dans les quartiers et le colmatage des canaux d'évacuation.
- La préservation de l'écosystème marin contre la pollution et la protection de la population contre la consommation des produits marins toxiques.
- La diminution d'épidémies causées par la pollution de l'eau en améliorant la qualité de l'eau des puits (nappe phréatique).
- L'amélioration de la qualité de l'eau de baignade dans la baie de Toliara.

III. 3. 5. 2 - Avantages socio-économiques

Les avantages socio-économiques sont principalement :

- Le développement du secteur touristique (qui apporte des revenus aux habitants).
- Des économies de santé pour chaque ménage en améliorant la santé générale.
- La création d'emploi pour l'installation et l'exploitation de la station.
- Des réponses aux besoins de confort du public.

Conclusion

La commune urbaine de Toliara est une ville à forte croissance démographique avec une forte migration. Ceci provoque des constructions illicites dans la ville et aucun plan d'urbanisation n'est respecté. Toliara connaît un grand problème d'évacuation des eaux usées suite à la topographie de la ville, au non recouvrement des égouts, au mauvais comportement des habitants, à l'insuffisance de la responsabilisation des services techniques de la mairie. Les canaux d'évacuation existants dirigent directement les effluents à la mer. Aucune station d'épuration n'est installée jusqu'à maintenant même si l'idée de collecter les eaux résiduaires est apparue dans le PUDi de 2003.

Des règlements qui définissent la qualité des effluents qu'on peut évacuer en milieu naturel existent à Madagascar mais des études faites par des chercheurs montrent que les eaux usées de la ville ne respectent pas ces normes. On constate que le rejet des effluents domestiques est confondu à celui des effluents industriels sans traitements préalables. Par conséquent, ces effluents contaminent, la nappe phréatique, la baie de Toliara et entraînent des intoxications causées par la consommation des produits marins, des maladies diarrhéiques et épidermiques.

La phytoépuration, une technique d'épuration des eaux usées domestiques par des plantes, a été étudiée par ce travail pour résoudre ces problèmes. Au cours de l'inventaire des plantes épuratrices de l'eau, des espèces sont identifiées notamment : *Colocasia esculenta*, *Cyperus alternifolius*, *Eichhornia crassipes*, *Nymphaea alba*, *Moringa oleifera*.

L'expérience menée avec l'espèce d'*E. crassipes* et la tige de *M. oleifera* aboutit à une amélioration de la qualité de l'eau traitée. *M. oleifera* est utilisé comme coagulant-floculant qui peut réduire la surface nécessaire pour la conception d'une station d'épuration. L'introduction de ces espèces ne modifie pas la valeur du pH de l'eau tandis que la valeur de la conductivité diminue et celle de l'oxygène dissous augmente progressivement. Le suivi de l'eau dans un bassin à *E. crassipes* montre que sa température est sensiblement constante.

Le suivi de la croissance d'*E. crassipes* au cours des trois saisons de Toliara révèle que le climat n'affecte pas la régénération de la plante bien que la biomasse diminue faiblement en saison fraîche et sèche.

La valorisation de ces deux espèces dans les secteurs énergétiques, agroalimentaires, artisanats, industriels présentent d'autres avantages.

La technique de cette phytoépuration consiste à écouler les eaux grises à traiter dans des bassins à deux niveaux. Le premier est traité par la tige de *M. oleifera* et l'autre par d'*E. crassipes* (jacinthe d'eau) avec un temps de rétention de l'eau défini. Ce type de traitement des eaux usées

collectifs ou individuels est adapté à cette technique de traitement des eaux peu coûteuse et écologique. Elle est facile à concevoir et à exploiter. Une ébauche de station d'épuration a été proposée. Mais la recherche mérite d'être continuée surtout sur l'utilisation du tronc de *M. oleifera* dans cette technique.

L'étude a permis de répondre aux hypothèses de départ :

- Aucune station d'épuration n'est installée à Toliara. L'hypothèse a été vérifiée.
- Des plantes épuratrices d'eaux usées existent dans la ville de Toliara. L'hypothèse est vérifiée pour les deux espèces de plantes épuratrices proposées.
- Les eaux usées de Toliara sont favorables au développement des plantes épuratrices. L'hypothèse est vérifiée pour les eaux grises.

Au vu des résultats de l'étude, plusieurs recommandations sont proposées :

- Le plan d'urbanisme doit être respecté.
- Les comportements doivent changer.
- Des bassins pour la rétention des eaux pluviales doivent être construits.
- Les ordures doivent être ramassées régulièrement.
- Les égouts à ciel ouvert doivent être suivis.
- La commune et chacun des habitants doivent être responsabilisés et sensibilisés à la protection de l'environnement (utilisation de l'école et des radios locales).
- Les déchets triés doivent être valorisés et recyclés.
- Des latrines (toilettes sèches) doivent être utilisées.
- Les déjections doivent être transformées en biogaz.
- Les produits chimiques dans les eaux usées domestiques doivent être réduits en valorisant l'espèce de savonnier *Sapindus sp.* pour le lessivage et le nettoyage écologique moins coûteux.
- Le système d'évacuation des eaux usées de l'hôpital doit être aménagé avec l'installation d'une station de traitement adéquate.
- Le traitement individuel des effluents pour les particuliers qui ne sont pas rattachés au réseau d'égout doit être exigé.
- Une police de l'eau à la mairie doit être créée pour contrôler l'installation de la station d'épuration.
- Des canaux d'évacuation doivent être construits ou réhabilités.
- Le traitement des effluents des sociétés industrielles doit être obligatoire.
- Des investissements dans les traitements des effluents par fokontany doivent être faits.
- La culture de *Moringa oleifera* à Toliara ville et en périphérie doit être développée en accord avec l'industrie d'extraction d'huile de moringa (INDOSUMA).

- Un contrôle régulier en amont et en aval des installations doit être fait.
- Une gestion de l'eau doit être envisagée au niveau de la ville.

Références bibliographiques

ALMOUSTAPHA O. 2004. Gestion et valorisation des plantes envahissantes. Cas de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laub. (Pontederiaceae). Mémoire de DEA, Université de Ouagadougou, 47 p.

ALMOUSTAPHA O., RASOLONDIMBY M.J. 2006. Production de biogaz et de compost à partir de *Eichhornia crassipes*, (mart) solms-laub (pontederiaceae) pour un développement durable en Afrique sahélienne. *VertigO* - la revue électronique en sciences de l'environnement, (URL <http://vertigo.revues.org/index2221.html>).

ANDZANATIORA S.S. 2006. Test d'efficacité du traitement des eaux par l'utilisation des graines de *Moringa oleifera*. Cas de la zone de collecte de la COPEFRITO. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de maîtrise en sciences et techniques de la mer et du littoral. IHSM- Université de Toliara. 40p.

CHANTREL E., SAINT-SAUVEUR A. de. 1993. Caractéristiques du *Moringa* pour le traitement des eaux. Propage. 22 p.

DEGRÉMONT . 1989. Memento technique de l'eau. Tome 1. 9^èm^e édition : Édition du cinquantenaire.

ENCYCLOPÉDIE MICROSOFT ® ENCARTA ® 2005.

ENDA. 2000. L'épuration extensive des eaux usées pour leur réutilisation dans l'agriculture urbaine : des technologies appropriées en zones sahéliennes pour la lutte contre la pauvreté projet 04367. ENDA Tiers Monde, Dakar. 69 p.

FATOMBI J. K., JOSSE R.G., MAMA D., AMINOU T. 2009. Etude de l'activité floculante de la caséine acide extraite de la crème de *Cocos nucifera* dans la clarification des eaux de surface. *Revue des sciences de l'eau*. 22 : 93-101 (<http://id.erudit.org/iderudit/019826ar>).

FOIDL N., MAKKAR H.P.S. BECKER K. 2002. Potentiel du *Moringa oleifera* pour les besoins agricoles et industriels. Actes de l'atelier international de Dar es Salaam, 29 octobre-2 novembre 2001, CIRAD/PROPAGE/SILVA (www.moringanews.org).

FOLKARD G. 1997. The development of the *Moringa oleifera* and *M. stenopetala* tree to provide valuable products: coagulant for water/wastewater treatment and vegetable oil. Rapport à la Commission Européenne.

GARDEA TORRESDEY J.L., PERALTE-VIDEA J.R., DE LA ROSA J.R., PARSON, J.G. 2005. Phytoremediation of heavy metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coordin. Chemistry. Reviews* 249: 1797-1810.

GERSTL S. 2001. The economic cost and impact of home gardening in Ouagadougou, Burkina Faso. PhD thesis. University of Basel, Basel. 428 p.

GOPAL, B. 1987. Water hyacinth. Elsevier, Oxford, 471 p.

GOUVERNEMENT DE LA RÉPUBLIQUE DE MADAGASCAR. 2003. Décret N°2003/464. 2003. Classification des eaux de surface et réglementation des rejets d'effluents liquides. 9p (www.jurismada.com)

HARIDON L' L. 2006. Évolution de la collecte de poulpe sur la côte Sud Ouest de Madagascar : élément de réflexion pour une meilleure gestion des ressources. Blue Ventures Conservation Report. 46 p.

HERHAJANIAIVO A.M. 2008. Contribution à la purification de l'eau brute avec un principe actif extrait de graine de *Moringa oleifera*. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Études Approfondies (DEA). Département Génie Chimique. École Supérieure polytechnique. Université d'Antananarivo. 96 p.

HOLM L.G., PLUCKNETT D.L., PANCHO J.V., HERBERGER J.P. 1977. The world's Worst Weeds. Distribution and biology. University Press of Hawaiï. Honolulu. 69 p.

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT (IRD). 2013. Sciences au Sud n°70 : 1-16

KONÉ D. 2002. Épuration des eaux usées par lagunage à microphytes et macrophytes en Afrique de l'Ouest et du centre : État des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement. Thèse de Doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse). 170p.

LI X., WU Z., HE G. 1995. Effects of low temperature and physiological age on superoxide dismutase in water hyacinth (*Eichhornia crassipes Solms*). Aquatic Botany 50: 193-200.

MACROPHYTES ET TRAITEMENT DES EAUX. 2005. Épuration des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes. Recommandation technique pour la conception et la réalisation. 45 p.

MANDI L., DARLEY J., BARBE J., BALEUX B. 1992. Essais d'épuration des eaux usées de Marrakech par la jacinthe d'eau (charge organique, bactérienne et parasitologique). Revue de la science de l'eau 5 : 313-333.

MONOGRAPHIE DE LA VILLE DE TOLIARA. 2012.

MONOGRAPHIE DU SUD-OUEST. 2011.

- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE (NAS). 1979.** Making Aquatic weeds useful: some perspectives for developing Countries. 4ème ed. NAS, Washington, DC (USA). 174 p.
- PALETTE. 1999.** Projet de développement agricole autonome contre la désertification et la précarité rurale par la culture du *Moringa oleifera* et le développement des techniques écologiques. Quartier Ndiop à Méné République du Sénégal. 55 p.
- PIERMONT L. 1982.** Énergie verte. Ed. Seuil. Paris. 256 p.
- RAJAONA G., RAJOHARISON J., RAJAONA A. 2004.** Plan d'Urbanisme Directeur (PUDI-CUT). Rapport Final. 85 p.
- RAKOTOARISON H.A. 2008.** Analyse de la qualité des eaux usées municipales dans la commune urbaine de Toliara: proposition de dimensionnement d'une station de lagunage. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de Diplôme d'Études Approfondies. Département de Chimie Minérale et de Chimie Physique. Faculté des Sciences. Université d'Antananarivo. 112 p.
- RAKOTOVAO J.M. 2004.** Profils du cortège de dinoflagellés toxiques et des bactéries allochtones associées aux accidents alimentaires par consommation d'animaux marins : approche à travers les coquillages consommés à Tuléar, Madagascar. Thèse de doctorat en océanologie appliquée. IH-SM, Université de Toliara. 188 p.
- RANARIJAONA H.L.T., ZAINABO F., ANDRIAMANANTENA A.H., ANDRIANASETRA G.S. 2013.** Évaluation de la prolifération de la Jacinthe d'eau du lac Ravelobe Ankarafantsika et plan de restauration. Vertigo. La revue électronique en sciences de l'environnement. Volume 13 Numéro 1. <http://vertigo.revues.org>
- RASOAMANANTO I. 2006.** Structure and variation spatio-temporal of the planktonic diatoms communities in the Toliara bay (south-west Madagascar). D.E.A. in Applied Oceanography. IH-SM. Université de Toliara. 73 p.
- RAZAFINDRAVAO C. 2010.** Détermination des caractéristiques des eaux usées en vue d'un traitement (cas de la COPEFRITO S.A.). Mémoire de Master ès Sciences marines. Institut Halieutiques et des Sciences Marines. Université de Toliara. 77 p.
- SOLPHI J.H. 2011.** Application of Municipal Wastewater Technology to semi-arid Regions: A pilot Study using à Constructed Wetland in Toliara city, Madagascar. Thèse de doctorat en océanologie appliquée. IH-SM, Université de Toliara. 152 p.

WOLVERTON B.C, KOWN M.C, DONALD RC. 1979. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). Productivity and harvesting studies. Econ. Bot. 33 : 1-10.

ANNEXE 1 : Extrait du code de l'eau à Madagascar

Décret n° 2003/464 de la 15/04/03 portant classification des eaux de surface et réglementation des rejets d'effluents aqueux

Article 1: le présent texte sur la classification des eaux de surface et sur les normes rejet d'effluents aqueux dans le milieu naturel.

Article 2: les eaux de surface (cours d'eau, lacs et tous plans d'eau) sont classées de la manière suivante: CLASSE A: eau de bonne qualité, usages multiples possibles

CLASSES B: eau de qualité moyenne, loisirs possibles, baignade pouvant être interdite

CLASSE C: eau de qualité médiocre, baignade interdite

HC hors classe: 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.

PARAMÈTRES	CLASSE A	CLASSE B	CLASSE C	HORS CLASSE
FACTEURS BIOLOGIQUES				
Oxygène dissous (mg /l)	$5 \leq OD$	$3 < OD < 5$	$2 < OD \leq 3$	$OD < 2$
DBO (mg /l)	$DBO \leq 5$	$5 < DBO \leq 20$	$20 < DBO \leq 70$	$70 < DBO$
DCO (mg /l)	$DCO \leq 20$	$20 < DCO \leq 50$	$50 < DCO \leq 100$	$100 < DCO$
Présence de germes pathogènes	Non	Non	Non	Oui
FACTEURS PHYSIQUES ET CHIMIQUES				
Couleurs	Oui (incolore)	Non (incolore)	Non (incolore)	Non (incolore)
Température (°C)	$\theta < 25$	$25 \leq \theta < 30$	$30 \leq \theta < 35$	$35 < \theta$
pH	$6,0 \leq pH \leq 8,5$	$5,5 < pH < 6,0$ ou $8,5 < pH < 9,5$	$pH \leq 5,5$ ou $9,5 \leq pH$	
MES (mg /l)	$MES < 30$	$30 \leq MES < 60$	$60 \leq MES < 100$	$100 < MES$

Article 3: sont considérés comme des rejets liquides polluants

- Les eaux usées provenant des infrastructures hôtelières
- Les effluents industriels provenant de tous types d'activités de production manufacturière ou de transformation.

Article 4: les rejets d'eaux usées doivent être incolores.

Articles 5: aucun effluent ne doit causer des nuisances olfactives à une distance de 10 m de la source.

Article 6: les eaux usées provenant d'une enceinte abritant une activité économique donnée doivent respecter la qualité suivante :

Paramètres	Unités	Normes
Facteurs organoleptiques et physiques		
pH		6,5 -9,0
Matières en suspension	mg /l	200
Température	°C	60
Couleur	Échelle Pt	20
turbidité	Co NTU	20
FACTEURS CHIMIQUES		
Dureté totale comme CaCO ₃	mg /l	180,0
Azote ammoniacal	mg /l	15,0
Nitrates	mg /l	0,2
Nitrites	mg /l	20,0
NTK (azote total Kjeldahl)	mg /l-N	10,0
Phosphates comme PO ₄ ³⁻	mg /l	250
Sulfates comme SO ₄	mg /l	1,0
Sulfures comme S—	mg /l	10,0
Huiles et graisses Phénols et crésols	mg /l	1,0
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	mg /l	1,0
(HAP) Agents de surfaces (ioniques ou non)	mg /l	20
Chlore libre	mg /l mg /l	1,0
FACTEURS BIOLOGIQUES		
DCO	mg /l	150
DBO	mg /l	50

Les paramètres de base pour chaque secteur d'activité seront extraits de ce tableau en fonction des besoins de la situation.

Article 7: les prélèvements seront effectués de manière à assurer une représentativité des effluents au(x) points de rejet: soit un minimum de 8 échantillonnages primaires par point de rejet et répartis sur une journée (conforme au rythme de travail de l'unité) avec lesquels un échantillon moyen sera obtenu. Un échantillonnage continu avec un appareillage adéquat constitue l'idéal. Si le débit et/ou la nature des rejets change(nt) en fonction de la nature des différentes opérations unitaires effectués quotidiennement, un échantillon moyen pondéré (débit

instantané et durée) sera à obtenir.

Article 8 : les valeurs limites de rejet seront définies par d'autres textes qui peuvent prendre un caractère sectoriel suivant leurs spécificités ; elles tiendront compte de la qualité des milieux récepteurs).

Article 9 : les effluents ne doivent présenter aucun risque microbiologique pour les riverains.

Article 10 :

a) les épandages de boues issues de traitement d'eaux usées ne peuvent se faire que dans les conditions suivantes :

Élément	Concentration maximale dans la boue (mg/kg de matières sèches)	Apport maximal (kg/ha /10ans)
Cd	40	1.5
Cr	2,000	45
Cu	2,000	120
Hg	20	1
Ni	400	30
Se	200	1
Zn	6 000	300
Cr	8,000	120

b) Après épandage de boues, le pH du sol ne doit pas être inférieur à 6.

Article 11: En période d'épidémie, les autorités compétentes peuvent instituer d'autres analyses bactériologiques particulières.

Article 12: Le présent décret sera publié dans le journal officiel de la République et diffusé et communiqué partout où besoin sera.

ANNEXE 2 : Eléments chimiques contenus dans les eaux usées de Toliara. P : Palétuvier, B : Besakoa, M : mangrove (Source : RAKOTOARISON, 2008)

Caractéristiques	Liquides			Boues solides			
	Quartiers	P	M	B	P	M	B
pH		8,4	8,1	7,6			
Turbidité (NTU)		2,1	13,5	8,1			
MES (mg/l)		20	450	175			
Nitrate (mg/l)		37	25	47			
Nitrite (mg/l)		680	20	700			
Phosphore (mg/l)		0,6	1,2	0,4			
Phosphate (mg/l)		1,2	5	0,9			
Azote Kjeldhal (mg/l)		4,9	7,2	5,8			
Chlorure (mg/l)		200	220	330			
DBO5 (mg/l)		3,8	14,1	14,2			
DCO (mg/l)		55	280	100			
DBO5/DCO		0,06	0,05	0,14			
Métaux lourds							
Cuivre ($\mu\text{g/g}$)		1,9	0	2,4	13,8	19	8,2
Fer ($\mu\text{g/g}$)		0	0	600	17200	28000	20000
Nickel ($\mu\text{g/g}$)		0	0	0	6,8	10	6
Zinc ($\mu\text{g/g}$)		5	8	6	100	100	55
Chrome ($\mu\text{g/g}$)		10	0,8	10	22	27	18
Manganèse ($\mu\text{g/g}$)		0,2	0,6	0,4	180	610	210
Plomb ($\mu\text{g/g}$)		2	2,5	2	25	20	8

ANNEXE 3 : Consommation d'eau de la société COPEFRITO selon les produits traités (Source : RAZAFINDRAVAO, 2010)

	Quantité d'eau consommée (m ³)	Quantité des produits traités (en %)				
		poulpe	calmar	crabe	langouste	poisson
Maximum journalier	88	10 672	116	812	0	0
Minimum journalier	2	389,5	20,5	0	0	0
Moyenne journalière	40	1 682,5	267	614,1	26,7	80,1
Moyenne vives eaux	400	18 095	2 585	4 136	258,5	775,5
Moyenne mortes eaux	230	10 374	2 002	4 732	182	728
Total annuel	14 900	581 742	92 340	212 382	9 234	27 702

ANNEXE 4 : Planches de photos sur le savonnier *Sapindus sp.*



Figure f : Un pied de *Sapindus sp.* à l'enceinte du service de l'Eau et forêt à Toliara centre (RAJAONARIVELO, 2013)

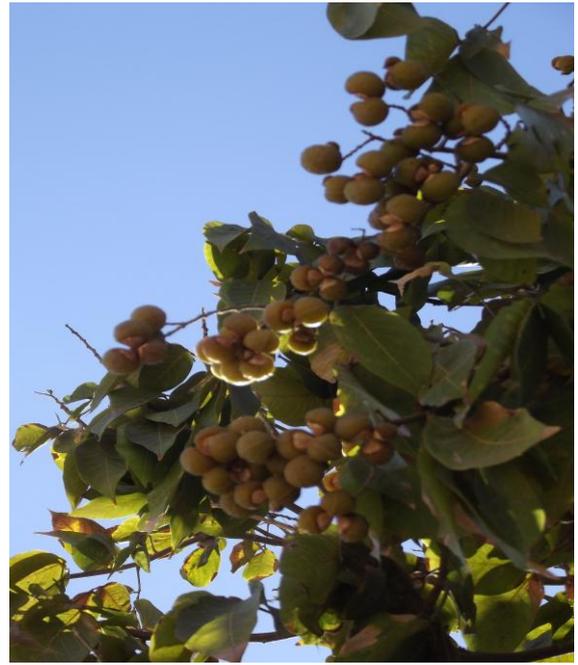


Figure g : Fructification de *Sapindus sp.* à l'enceinte du service de l'Eau et Forêt à Toliara centre (RAJAONARIVELO, 2013)



Figure h : Des fruits de *Sapindus sp.* séchés (RAJAONARIVELO, 2013)



Figure i : Essai de lessivage avec un seul noix de *Sapindus sp.* (RAJAONARIVELO, 2013)

ANNEXE 5 : Questionnaires pour les enquêtes

Pour le ménage

Taille du ménage:

- Approvisionnement en eau :
- Eau de la JIRAMA
- Puits
- Pompe japy
- Privée
- Public
- Combien de litre d'eau avez-vous besoin chaque jour ?
- Comment utilisez-vous cette quantité d'eau ?
- Avez vous des latrines?

Avec chasse d'eau (WC)	Avec trou : toilette sèche (TS)

- Comment vous videz les fosses?
- Êtes-vous connectés à un égout ?
- Comment évacuez-vous les eaux grises ?
- Où est ce que vous jetez les ordures ménagères ?

Pour les industries

- 1- Depuis quand la société existe à Toliara ?
- 2- Quels sont vos domaines d'activités ?
- 3- Dans votre société, à quoi utilisez-vous l'eau ?
- 4- Quel est le volume d'eau que vous consommez par jour ou par mois?
- 5- Comment évacuez-vous les eaux usées issues de votre société ?
- 6- Quels sont les produits chimiques que vous utilisez pour le rinçage ?
- 7- Où évacuez-vous ces eaux usées ?
- 8- Est-ce que vous avez déjà analysé ces eaux usées ?
- 9- Est-ce qu'il y a des traitements préalables avant le rejet dans le milieu naturel ?
- 10- Si oui, quel est la technique utilisée ?
- 11- Si non, est ce que vous trouvez des conséquences négatives sur l'inexistence du traitement des eaux venant de votre société ?
- 12- Est-ce que vous avez de projet pour traiter les eaux usées ?

13- Y a-t-il un emplacement possible dans l'entreprise pour traiter les eaux grises ?

Pour les hôtels

Nom de l'hôtel : Localisation : Nombre de chambres :

Existence de piscine : OUI- NON

- Quel est le volume d'eau que vous consommez par jour ou par mois?
- Comment avez-vous évacuez les eaux usées issues de votre hôtel ?
- Est-ce qu'il y a des traitements préalables avant le rejet dans le milieu naturel ?
- Si oui, quel est la technique utilisée ?

Pour la JIRAMA

- Combien de bornes fontaines existent à Toliara ?
- Est-ce que vous avez un plan des bornes fontaines à Toliara ?
- Quel est le nombre des ménages qui ont leurs propres robinets ?
- Quel est le volume d'eau consommée par jour par la population de Toliara ?
- Est-ce que vous avez des données sur les pourcentages de différentes utilisations de l'eau de la ville?
- Par rapport au nombre de la population, d'après vous, est ce que la population de Toliara gaspille l'eau ?

Pour l'hôpital

- Quel est la quantité d'eau consommée par l'hôpital par mois ?
- Est-ce que vous avez un plan du système d'évacuation des eaux usées ?
- Est-ce que vous traitez les eaux usées ?

ANNEXE 5 : Liste de quelques végétaux ayant des propriétés floculantes

(Source : Chantrel et Saint Sauveur, 1993)

Famille	Genre	Espèces	Partie utilisée
Capparidaceae	<i>Boscia</i>	<i>senegalis</i>	Résine de l'écorce
	<i>Courbonia</i>	<i>denhardtiorum</i>	racine
	<i>Maerua</i>	<i>edulis</i>	racine
Moringaceae	<i>Moringa</i>	<i>concanensis</i>	graine
		<i>drouhardii</i>	graine
		<i>longituba</i>	graine
		<i>oleifera</i>	graine
		<i>ovalifolia</i>	graine
		<i>stenopetala</i>	graine
		<i>peregrina</i>	graine
Cactaceae	<i>Cereus</i>	<i>repandus</i>	sève
		<i>validus</i>	sève
	<i>Opuntia</i>	<i>ficus-indica</i>	sève
		<i>tuna</i>	sève
		<i>vulgaris</i>	sève
		<i>inermis</i>	sève
		<i>quimilo</i>	sève
		<i>kiska-loro</i>	sève
		<i>dilenii</i>	sève
	Papilionoidea	<i>Phaseolus</i>	<i>mungo</i>
<i>Vicia</i>		<i>faba</i>	graine
Rosaceae	<i>Prunus</i>	<i>armeniaca</i>	noyau
		<i>persica</i>	noyau
Anacardiaceae	<i>Schinopsis</i>	<i>quebracho-colorado</i>	Tanin de l'écorce
Meliaceae	<i>Azadirachta</i>	<i>indica</i>	feuille
Acanthaceae	<i>Blepharis</i>	<i>buchneri</i>	feuille
	<i>Hypoestes</i>	<i>verticillaris</i>	graine

RESUME

La ville de Toliara, située dans la région sud ouest de Madagascar, a une population de 214 000 habitants sur une surface de 18 km². La population évacue plus de 5 400 m³ d'eaux usées dans la nature. Tous les canaux d'évacuation, de faible couverture, jettent les effluents domestiques, industriels, et les eaux pluviales dans la mer. Aucune station d'épuration n'est encore installée dans cette ville. Alors, l'environnement est gravement menacé ainsi que la santé de la population. La phytoépuration est une technique écologique efficace pour le traitement des eaux grises, peu coûteuse et facile à installer. C'est une des solutions proposées pour résoudre ce problème de pollution. Parmi les 14 espèces de plantes épuratrices recensées à Toliara, *Eichhornia crassipes* (jacinthe d'eau) et *Moringa oleifera* (ananambo) ont été choisies pour leur taux d'épuration élevée. Le projet d'une station phytoépuration, composée de cinq bassins à deux étages est recommandé. L'introduction de la tige de *M. oleifera* jouant le rôle de coagulant-floculant peut diminuer la surface nécessaire de cette station d'épuration. Le climat de la région est favorable au bon fonctionnement de la station même en hiver. La valorisation de la biomasse de ces deux espèces dans l'agriculture, l'artisanat et comme source d'énergie présente un autre avantage. L'aménagement du réseau d'égout alimentant la station serait prioritaire. L'utilisation des toilettes sèches, le développement du biogaz et une grande réforme sur le respect de l'environnement sont complémentaires à ce projet de station à Toliara.

Mots clés : Toliara, eaux usées, traitement, jacinthe d'eau, phytoépuration, moringa.

SUMMARY

Located in the south ouest of Madagascar, Toliara city contains 214 000 habitants an area around 18 km². Those population evacuate over 5400 m³ of wastewater in nature. All drainage channels, low coverage, throw domestic waste, industrial and storm water waste into the sea. Water waste treatment plant is still installed in this city. While the environment is threatened. The phytoperification, an effective technique for the treatment of gray water, ecological, less expensive and easy to install, is the proposed solution to solve this problem. Among the 14 species purifying plants listed in Toliara, *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) and *Moringa oleifera* (ananambo) are chosen for their high levels of purification. The station consists of 5 pools on two levels. The introduction of *Moringa oleifera* rod acting as coagulant-flocculant may reduce the required surface treatment plant. The climate of the region is conducive to the good functioning of the plant even in winter. The biomass of these two species has another advantage in agriculture, craft, source of energy, economy, food improvement. The management of the sewer in this city is a priority. The use of dry toilets, biogas development and a major reform of respect for the environment are necessary for the population of Toliara.

Keywords: Toliara, wastewater, treatment, water hyacinth, moringa