

	<p>DEPARTEMENT DE MAYOTTE COMMUNE DE CHIRONGUI – Village de MALAMANI</p>		
	<p>Etude de la capacité épuratoire de la mangrove</p> <p><i>Unité de traitement des eaux usées de Malamani</i></p>		
			
<p>PARTENAIRES</p>			
			
<p>Office National des Eaux et Milieux Aquatiques</p>	<p><i>DEAL de Mayotte</i></p>	<p><i>Parc Marin de Mayotte</i></p>	<p><i>Conservatoire du Littoral de Mayotte</i></p>
			
<p><i>Centre National de Recherche Scientifique</i></p>	<p><i>Université de Toulouse</i></p>	<p><i>Centre Université de Mayotte</i></p>	<p><i>Conseil Général de Mayotte</i></p>

1. CONTEXTE

Le Syndicat Intercommunal d'Eau et d'Assainissement de Mayotte (**SIEAM**) exerce en lieu et place des communes de Mayotte la compétence assainissement. La mise en place d'équipements d'assainissement collectif est une priorité pour des raisons de santé publique et de préservation de l'environnement. La problématique majeure rencontrée pour la réalisation de ces systèmes d'assainissement est la sensibilité des milieux récepteurs potentiels mahorais (lagon, sous-sols, rivières, mangroves).

En effet, les rejets en lagon sont difficiles à mettre en place en raison de la sensibilité environnementale forte de ce milieu et des coûts induits par la pose d'émissaires marins. De la même façon, les débits à infiltrer dans le sous-sol à l'échelle d'infrastructures collectives sont trop importants et nécessitent des surfaces d'infiltration non disponibles. Enfin, le réseau hydrographique de Mayotte est peu développé, les débits des rivières sont faibles, particulièrement dans le sud de l'île. En outre, celles-ci se jettent rapidement soit dans la mangrove, soit dans le lagon, compte tenu du caractère littoral des villages mahorais.

L'utilisation des mangroves comme système de traitement secondaire d'eaux usées peut être une solution alternative efficace applicable aux régions littorales tropicales. Diverses études scientifiques semblent montrer qu'aucun dérèglement écologique n'est observé lors du rejet de ces eaux en mangrove, dans la mesure où celles-ci (*i*) sont d'origine domestique (exemptes de métaux lourds, pesticides, hydrocarbures) et (*ii*) où elles subissent un traitement primaire (passage en décanteur) avant d'être rejetées dans le milieu naturel. D'autre part, l'action de dégradation des composés organiques des eaux usées par l'écosystème mangrove paraît tout à fait efficace.

Si le rôle bioépuration de la mangrove commence ainsi à être démontré, l'application *in situ* des processus de bioremédiation doit être réalisée dans des conditions scientifiquement contrôlées, et des expérimentations sont toujours nécessaires avant la mise en place d'un tel traitement.

C'est dans cette logique que le SIEAM a proposée au laboratoire d'écologie fonctionnelle et environnement EcoLab (CNRS, Université de Toulouse) de développer une action pilote sur le site de Malamani à Mayotte. Mis en place en septembre 2006, ce projet alternatif d'assainissement a pour objectif d'évaluer les capacités de bioremédiation de la mangrove vis-à-vis d'eaux polluées domestiques prétraités et de contribuer à valoriser cet écosystème à haute valeur écologique et patrimoniale, et lui-même soumis à une pression anthropique importante. Le projet est réalisé par une équipe de chercheurs et ingénieurs du laboratoire EcoLab (coordination : F. Fromard), auquel est associé une thèse (M. Herteman), soutenue par une allocation CIFRE (partenariat CNRS-SIEAM). La thèse et la collaboration SIEAM-CNRS tel que défini dans les différentes conventions ont abouti à une soutenance le 22 septembre 2010 à Toulouse.

Si les conclusions montrent une réelle capacité d'autoépuration de la mangrove, des doutes persistent. Certains aspects notamment sur le bilan quantifié de l'azote, le phosphore ou les analyses des crabes n'ont pu être abordé pleinement dans le cadre de la thèse. La phase recherche nécessite donc un approfondissement à la fois dans la durée pour pouvoir juger des impacts sur l'écosystème mais également dans les expériences à mener. C'est dans ce contexte qu'une phase 2 du suivi expérimental a été mise en place pour suivre les expérimentations durant 2 années supplémentaires (2011 à 2013) financé par le MEEDDM (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie du Développement Durable et de la Mer) avec un partenariat SIEAM – DEAL via un chargé de mission mangrove travaillant à mi-temps pour la DEAL de Mayotte et l'autre mi-temps sur le projet de Malamani pour le SIEAM.

2. PRESENTATION DE LA STATION EXPERIMENTALE

Le projet a consisté à la réalisation d'une unité de traitement de type décanteur digesteur, reprenant les eaux usées du lotissement de Malamani, suivi d'un rejet en mangrove via des canalisations posées sur pieux. Des parcelles expérimentales en mangrove (2 témoins, 2 impactées) sont installées et suivies par l'équipe CNRS.

Différents intervenants du projet :

Maitre d'ouvrage : commune de CHIRONGUI

Conducteur d'opération : DE

Maitre d'œuvre : ETG

Exploitation et suivi expérimentale : SIEAM

Conception et suivi du dispositif expérimental en mangrove : EcoLab

Les caractéristiques de l'unité de traitement type décanteur digesteur sont :

Type : décanteur digesteur

Nombre d'habitants raccordés : 400 EH

Débit moyen journalier : 40 m³/j

Volume impactée : 10 m³/j (x 2)

Mise en route : mai 2008



Station de traitement « décanteur-digesteur » + bassin tampon



Réseau de canalisation dans la mangrove

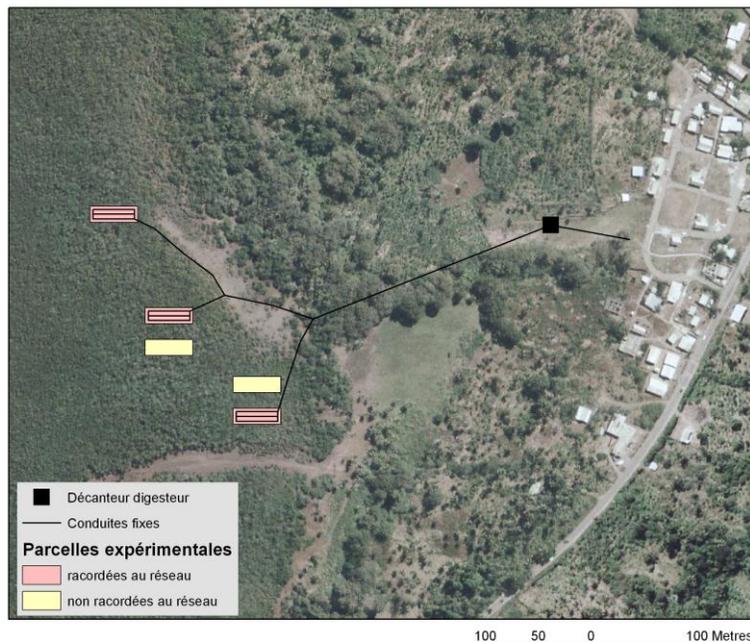
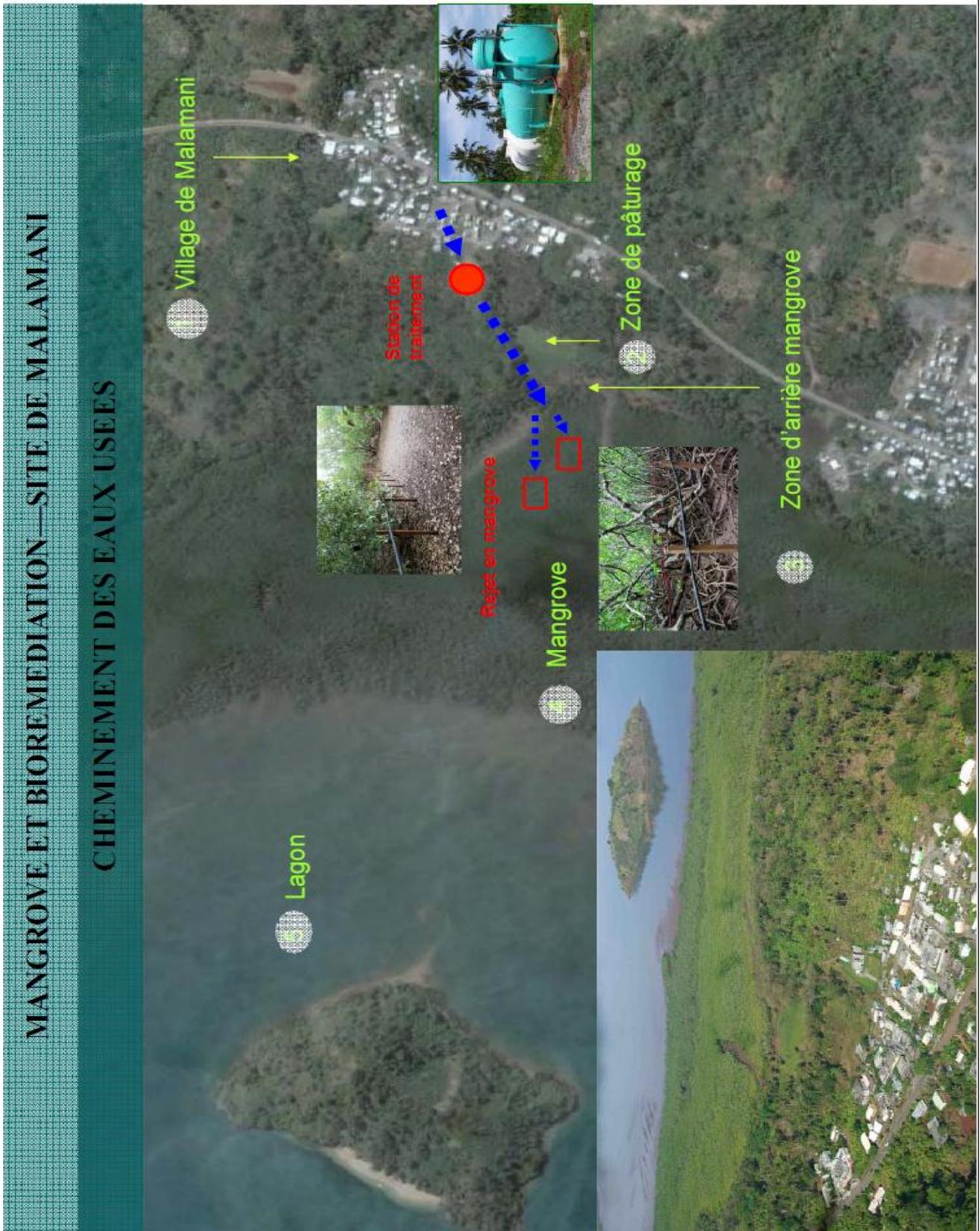


Schéma de fonctionnement de l'installation de Malamani



3. BILAN ET PREMIERS RESULTATS DU SUIVI EXPERIMENTAL - PHASE 1

Les premiers résultats relatifs à ce projet et les perspectives de mise en place d'une deuxième phase ont été exposés dans un document de synthèse (septembre 2009) et discutés lors du dernier comité de pilotage réuni à Mamoudzou (12 octobre 2009). Les documents correspondants sont redonnés en annexe.

1.1 Bilan du suivi expérimental – phase 1 (thèse)

Après 18 mois d'expérimentations et après analyse des nouvelles données obtenues (ARVAM janvier 2010) nous pouvons résumer d'une façon générale ces résultats,

Concernant la végétation et les crabes

- Les eaux usées sont absorbées par la végétation, qui assimile au moins en partie les composés azotés (expériences de marquage isotopique), préférentiellement sous forme NH_4 .
- Cette absorption est largement dépendante de la macroporosité du substrat, due essentiellement à l'activité des crabes (réseau de terriers).
- La végétation réagit par une croissance accrue (jeunes rameaux, surfaces foliaires, fruits), une concentration en pigments foliaires (notamment chlorophylle) plus importante et une plus grande efficacité photosynthétique (analyseur d'échanges gazeux).
- Les populations de crabes ne semblent pas significativement affectées par les rejets, ni dans leur structure (composition spécifique, densité) ni dans leur activité (terriers, prédation des propagules).

Concernant les eaux de surface et interstitielles

- Les teneurs en composés azotés (NO_3 et NH_4) peuvent augmenter localement dans les eaux de surface des parcelles impactées.
- Les concentrations en phosphore augmentent sensiblement dans les eaux interstitielles (30 cm et 100 cm de profondeur), en particulier dans le faciès *Cerriops* dans la deuxième série d'analyse (octobre 2009).
- Les concentrations bactériennes (*E. coli*) augmentent fortement dans la parcelle impactée *Rhizophora*, en particulier lors de la deuxième série d'analyses (octobre 2009).
- Les analyses ponctuelles réalisées dans le lagon en aval du site ne révèlent aucune anomalie concernant la qualité physico-chimique ou bactériologique de l'eau (analyses ARVAM).

L'ensemble de ces résultats est actuellement analysé et interprété, dans le cadre du mémoire de thèse de Mélanie Herteman et des publications en cours de rédaction.

3. OBJECTIFS ET PREMIERS RESULTATS DU SUIVI EXPERIMENTAL – PHASE 2

Les objectifs de la phase 2 sont de préciser les résultats quant à la pertinence de l'utilisation de la mangrove de Malamani pour le traitement secondaire d'eaux usées domestiques. Ce n'est qu'au terme de cette phase, et selon les résultats obtenus, que l'on envisagera,

- Soit de définir les conditions de passage de l'expérimentation-pilote actuelle à une phase opérationnelle,
- Soit de revenir à un système de traitement classique si les résultats de la phase expérimentale ne s'avèrent pas concluants, et/ou si la réglementation ne nous le permet pas.

A ce stade de la phase 2, la première option est envisager (possibilité de passer à une phase plus opérationnelle (qui nécessite cependant quand même un suivi poussé de la mangrove)).

Dans tous les cas, le système expérimental de rejets en mangrove devra être modifié. Une proposition de modification du système de prétraitement (niveau décanteur) pourrait aussi être envisagée, pour améliorer l'abattement en amont des composés azotés et phosphorés

Plusieurs volets sont à distinguer pour la phase 2:

- i. Les prélèvements, analyses, suivis à réaliser au cours de l'année : actions SIEAM
- ii. Les expérimentations à poursuivre conduites par l'équipe CNRS au cours des missions, et les analyses associées de l'ARVAM
- iii. Les expérimentations complémentaires

1.1.1 Les actions SIEAM

- Prélèvements et analyses régulières (tous les 3 mois) des eaux usées au niveau de la cuve de stockage, prélèvements et analyses (y compris métaux lourds) d'échantillons de boues résiduelles dans le décanteur (2 fois/an).

Les données relatives à la composition des eaux usées à la sortie du décanteur sont essentielles à l'établissement des bilans azotés et phosphorés. Les données acquises dans ce domaine sont cependant très fragmentaires et ne permettent pas d'établir à ce jour des bilans corrects. De même, il est important d'avoir des analyses régulières sur la composition des boues (métaux lourds notamment), à réaliser idéalement à chaque curage de cuves (2 fois/an).

- Surveillance et réétalonnage du système informatique SOFREL (planification des heures de rejets en fonction des heures de marées).

Ce système est à re-étalonner une fois par an (décembre) pour être recalé sur le cycle des marées et son fonctionnement doit être régulièrement vérifié. Les données de débits et de volumes rejetés dans les parcelles sont indispensables à la caractérisation des bilans.

- Maintenance du système de rejets en mangrove.

Le réseau en place entre décanteur et mangrove (transport des eaux usées) et en mangrove (rejets) nécessite un entretien régulier (fixations des tuyaux, décolmatage et purge).

- Suivi des enregistreurs automatiques de hauteur d'eau et conductivité en place dans 2 piézomètres (relevé des données enregistrées tous les 3 mois).
- Suivis hebdomadaires de la productivité de la mangrove (collecte et tri des litières) et du réseau de piézomètres (hauteurs d'eau, salinité).

Le suivi de ces deux derniers points a été assuré jusqu'en mars 2010 par la société ESPACES via un contrat CDD à mi-temps et renouvelé jusqu'à fin décembre 2013. Pour un bilan de la productivité de la mangrove et de la dynamique hydrique, il est important que ces acquisitions se poursuivent jusqu'au terme de la phase expérimentale.

- *Réhabilitation des réseaux et des ouvrages en amont de la station d'épuration.*

Les travaux de la station et des réseaux n'ont pas été réalisés sous maîtrise d'ouvrage Sieam et présente de nombreux dysfonctionnements, notamment des infiltrations d'eaux claires parasites permanentes. La station est en cours de rétrocession au service exploitation du Sieam avec acquisition du foncier. Par ailleurs, des actes de vandalisme ont également affaibli et le matériel d'auto surveillance (débitmètre) cassé. L'objectif est de réhabiliter le site afin d'avoir un système d'assainissement (réseaux + step) exemplaire. Ces travaux ont été réalisés en juin 2011.

1.1.2 Poursuite des expérimentations et analyses CNRS et ARVAM

- *Suivi de la végétation: régénération, croissance, photosynthèse, analyses foliaires,*
- *Suivi des populations de crabes : comptages, caractérisation crabes et terriers.*
- *Analyses de substrats : profils salinité, composés azotés, matière organique.*
- *Suivi du compartiment eau (collaboration ARVAM) : caractérisation physico-chimique en particulier azote et phosphore dans et en aval des parcelles et dans les chenaux d'écoulement*
- *Suivi bactériologique (collaboration ARVAM) dans et autour du site.*

L'évolution de la végétation et la stabilité constatée des populations de crabes est à vérifier sur un plus long terme (actuellement : analyses après 18 mois de rejets au plus) pour mettre en évidence d'éventuels effets de seuils. Les concentrations en azote et phosphore sont à suivre dans les compartiments eau, sédiment et végétation pour caractériser dans la durée leur éventuelle accumulation et leur dynamique. De même les concentrations bactériennes sont à surveiller, avec la prise en compte de nouveaux tests pour caractériser la dynamique des populations (*tests T9, collaboration ARVAM*).

1.1.3 Les expérimentations complémentaires à mettre en place

- *Réalisation de bilans azotés et phosphorés complets de l'écosystème.*

Les expérimentations relatives au marquage isotopique de l'azote dans les eaux usées, associées aux données relatives aux analyses foliaires et à la structure de la végétation, devraient nous permettre d'établir des bilans chiffrés concernant au moins les composés azotés. Des données complémentaires sont encore nécessaires pour mettre au point ces bilans, concernant en particulier le phosphore, pour lequel nous n'avons que des données fragmentaires, ainsi que l'évaluation des biomasses végétales. Une modélisation du transfert d'eau et de nutriments (N, P) entre décanteur, mangrove et lagon en aval, et prenant en compte le compartiment végétation serait ensuite importante à développer.

- *Analyses des crabes pour la caractérisation d'éventuels effets de toxicité.*

Si les populations de crabes paraissent stables et leurs activités non perturbées, il est nécessaire cependant de vérifier l'absence de contaminants toxiques dans les organismes. Des prélèvements et analyses seront faits pour les espèces dominantes de la mangrove de Malamani, en collaboration avec des spécialistes de ces questions. Un partenariat a été conclu à cet effet avec l'université de Mayotte. Ce projet est piloté par l'université de Mayotte appuyé par l'université de Montpellier et l'université d'Aix en Provence.

- *Tests métaux lourds et pesticides.*

Les eaux de rejets sont d'origine domestique, a priori exemptes de métaux lourds et de pesticides. Des tests de contrôles sont cependant à réaliser - pour compléter les analyses déjà faites dans ce domaine - dans les sédiments, les eaux et la végétation. En particulier, la qualité des eaux du lagon en aval du site de Malamani devra faire l'objet d'un suivi (nouvelles campagnes ARVAM).

3. SUITE DU SUIVI EXPERIMENTAL (PHASE 3)

Les options présentées ci-dessous permettent une amélioration du système de traitement et de rejet en mangrove et font suite à l'expérience acquises depuis 2007. Elles nécessitent cependant des travaux pour leur mise en œuvre. Ces travaux sont prévus dans une suite du suivi expérimental dite « phase 3 » pour laquelle une demande de financement a été demandé auprès de l'ONEMA à compter de l'année 2014.

1.1.4 Modification du système expérimental en mangrove

Le dispositif actuel est constitué de 5 parcelles de (45 m x 15 m) chacune (Figure 1 en annexe) :

Parcelles recevant les eaux usées en faciès *Ceriops* (PI) et *Rhizophora* (PIV)

2 parcelles témoins équivalentes (PII et PIII),

1 parcelle (PV) dans laquelle les volumes excédentaires d'eaux usées sont rejetés (saison des pluies).

Cette parcelle ne fait pas actuellement l'objet de suivi écologique

Il est proposé de le modifier selon la solution retenue :

(i) *Mise en place d'un système opérationnel de traitement*

L'emplacement (faciès *Ceriops*, *Rhizophora*), la disposition (orientation) et la surface (en fonction des rejets prévus) de la parcelle de traitement devront être redéfinis. Parmi les options envisagées pour la mise en place du dispositif opérationnel,

Installation de la parcelle de traitement au niveau des parcelles *Ceriops* ou *Rhizophora* actuelles (PI et PII ou PIII et PIV). La parcelle V seraient alors supprimée.

Installation de la parcelle de traitement au niveau de l'actuelle parcelle PV. Dans cette configuration, l'étude de l'évolution *naturelle* de la mangrove (PII et PIII) pourrait être poursuivie et la *résilience* de l'écosystème après arrêt de la perturbation apportée par les eaux usées pourrait être analysée (PI et PIV).

(ii) *Arrêt du système de traitement des eaux par la mangrove*

La parcelle PV est supprimée. Les parcelles de suivi actuelles peuvent être maintenues pour un suivi du fonctionnement de l'écosystème : parcelles témoins d'une dynamique naturelle PII et PIII, parcelles d'analyse de la résilience de la mangrove après arrêt d'une perturbation PI et PIV.

Dans les deux cas de figure, les études *fonctionnelles* de la mangrove pourraient donc se poursuivre. L'étude du site de Malamani trouverait alors toute sa place dans un *Observatoire de la mangrove de Mayotte* et/ou dans les actions du *Parc Marin*, avec un acquis déjà de plusieurs années sur la dynamique structurale et fonctionnelle de cet écosystème.

1.1.5 Amélioration du système de traitement

Le système de traitement actuellement en place pourrait être amélioré avec la mise en œuvre d'un traitement complémentaire permettant de nitrifier les effluents. En effet on a constaté que la mangrove permettait une bonne dénitrification mais une nitrification plus limitée. L'ajout d'un système de traitement complémentaire de type lit bactérien permettant de nitrifier les effluents pourrait apporter de meilleures garanties.

Ces « améliorations » nécessitent une étude avant de passer à la réalisation des travaux. Un appui technique pourra être proposé par IRSTEA.

N.B I : Ces options permettent d'optimiser les rejets en mangrove afin d'augmenter sa capacité épuratoire. Ces optimisations pourraient également permettre de voir si des optimisations du traitement et du rejet en mangrove permettent de limiter l'impact sur cette dernière.

N.B 2 : Il pourrait également être proposé dans l'esprit de la station d'épuration (traitement rustique simple) la mise en œuvre d'un traitement des boues « in situ » permettant de gérer les boues du décanteur-digesteur. Cette filière boue permettrait de limiter les transports. Ce projet irait dans le sens d'un traitement adapté, local à faible coût de fonctionnement et à fort caractère « développement durable ». Le traitement des boues pourrait être par exemple un traitement par filtres plantés. Cet objet ne fait pas partie de la présente demande de subvention mais pourrait faire l'objet d'un partenariat avec IRSTEA en parallèle du partenariat déjà engagé pour le suivi des filtres plantés de Hachenoua et Totorossa du SIEAM et de la présente opération de Malamani. IRSTEA pourra apporter un appui technique au dimensionnement d'un tel ouvrage.

1.2 LES RESULTATS ATTENDUS

Les résultats attendus sont les suivants :

- Définir la capacité de résilience de la mangrove après avoir été soumis pendant plusieurs années à des rejets d'eaux usées (population de crabes, végétation, accumulation et assimilation de l'azote et du phosphore...),
- Définition de bio-marqueurs permettant un suivi des mangroves de Mayotte soumis à des pressions anthropiques et anticiper des éventuels « seuil de tolérance »,
- Appui au schéma directeur d'assainissement collectif des eaux usées en proposant un passage opérationnel de l'expérience de Malamani à d'autres sites après évaluation de leur potentiel et définition des conditions de suivi (process et rendement de la STEP à respecter, dispositif de rejet en mangrove, suivi de la mangrove...),
- Approfondissement de la connaissance des mangroves et de sa capacité épuratoire avec notamment :
 - Potentiel d'absorption des sels nutritifs des mangroves,
 - Modélisation des cycles bio-géochimiques en mangrove,
 - Caractérisation des peuplements benthique (microfaune),
 - Toxicité des micropolluants et nouveaux polluants pour ces milieux,

3. DIVERS

COÛT D'EXPLOITATION

L'estimation des coûts d'exploitation de la STEP de Malamani est de 6 691 € / an, soit **17 € /habitant/an** ou encore 0,46 € au m³ (hors coût de renouvellement des ouvrages estimé à 20 707 € /an).

A titre de comparaison, une station de type biodisque de même capacité à un coût d'exploitation estimé à 15 463 € / an, soit **39 € /habitant/an** ou 1,06 € au m³ (hors coût de renouvellement des ouvrages estimé à 28 333 € /an).

Cette différence s'explique par la rusticité du système de traitement de Malamani utilisant un simple décanteur puis la capacité épuratoire de la mangrove

SITUATION ADMINISTRATIVE

Autorisation d'Occupation Temporaire

Traversée du Domaine Public du Conservatoire du Littoral – site de la mangrove de Boueni en date du 9 novembre 2011 pour une durée de 3 ans.

4. ANNEXES

4.1 ANNEXE 1 : CONCLUSIONS DE LA THESE (PHASE 1)à

A. Fonctionnement de l'écosystème mangrove

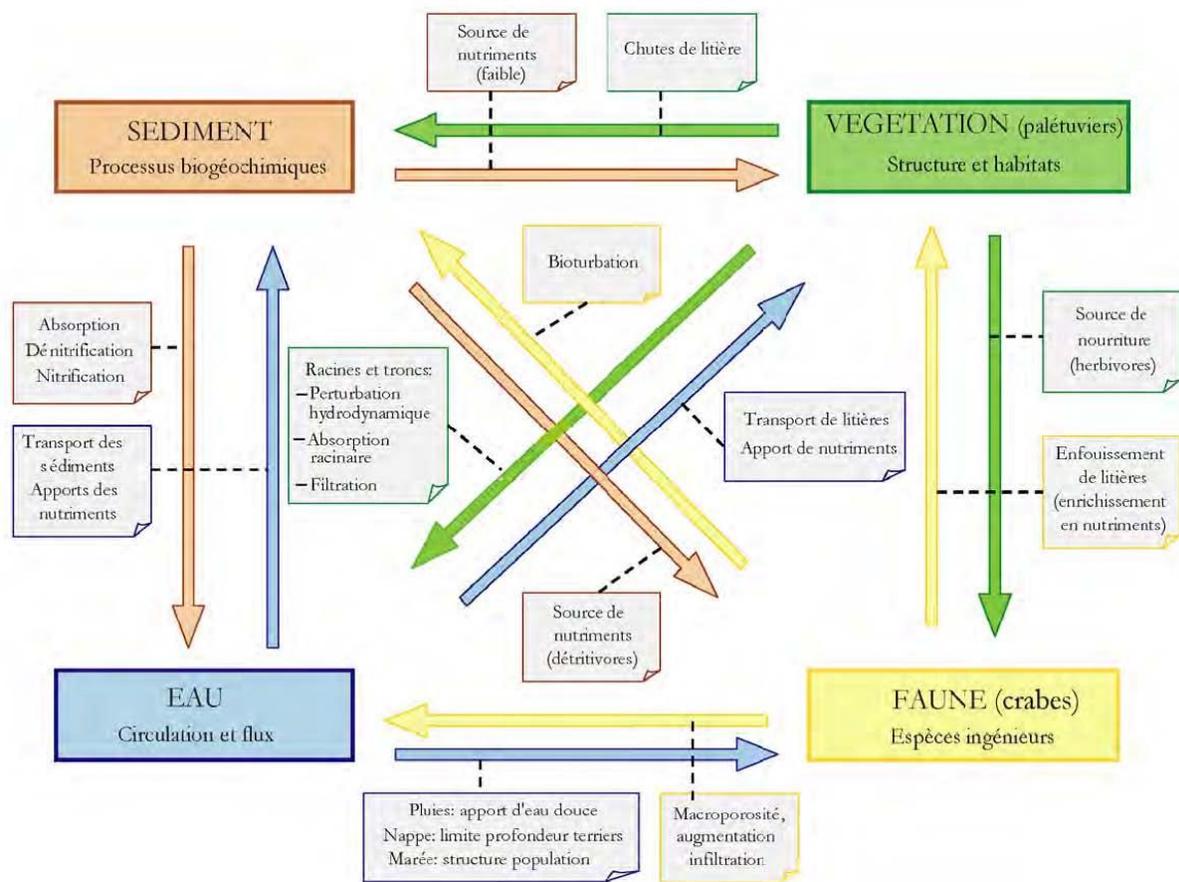
• **L'eau** est en grande partie à l'origine de la circulation des matières en suspension, du déplacement du sédiment, et de la dynamique particulière des mangroves (structure, régénération). En milieu côtier en général comme à Malamani, ces mécanismes sont principalement dus aux variations des niveaux d'eau lors de la marée et aux courants créés par le mouvement de la houle. La mangrove est quotidiennement inondée et exondée par le jeu des marées, ce qui engendre des conditions oxiques et anoxiques dans le sédiment, de transport des éléments nutritifs, de dilution et d'export des litières et de matière organique vers le lagon. La circulation des eaux douces provenant des petits cours d'eau du bassin versant vers la baie (rivières Djaradjajou, Chanfi) ainsi que des pluies durant la saison humide joue également un rôle important: apport de nutriments et de matière organique d'origine terrigène et apport d'eau douce indispensable. La nature, la texture et la faible porosité du sédiment constitué principalement par un dépôt argileux, font que l'eau circule préférentiellement en surface et que les mouvements hyporhéiques et horizontaux de la nappe sont très faibles. Ces mouvements conditionnent les processus biochimiques qui se déroulent dans le sédiment, et structurent les populations de palétuviers et de crabes selon plusieurs gradients (salinité, granulométrie, potentiel redox, éléments nutritifs) établis de l'amont vers l'aval.

• **Le sédiment** est le véritable siège des réactions biogéochimiques de nitrification, dénitrification, décomposition de la matière organique, puisqu'il contient les bactéries indispensables à la réalisation de ces processus. L'activité des populations bactériennes impliquées dans ces processus ainsi que leur répartition sont conditionnées par les propriétés physico-chimiques et la texture du sédiment. Les paramètres tels que la température, le pH, le potentiel redox, la composition chimique du sol ou encore la salinité conditionnent considérablement la cinétique de ces processus. La structure des sédiments est fortement influencée par l'écoulement des eaux comme on vient de le voir, mais aussi par les phénomènes de bioturbation induits par la macrofaune, en particulier les crabes. En effet, le caractère hydromorphe du sédiment argileux de Malamani limite la porosité et empêche les processus d'infiltrations des eaux. La porosité du sol n'est quasiment due qu'à la seule bioturbation des crabes.

Par ailleurs, le sédiment stocke les éléments nutritifs nécessaires à la nutrition des espèces végétales et animales. Bien que dans les sédiments de mangroves les teneurs en éléments nutritifs azotés et phosphorés soient naturellement faibles, la végétation y puise une partie des ressources nécessaires à son développement. En filtrant la partie superficielle du sédiment, les crabes détritvovores se nourrissent également grâce aux nutriments présents.

• **Les crabes** sont des éléments clés pour la compréhension du fonctionnement de la mangrove et peuvent être qualifiés d'espèces ingénieurs de cet écosystème. Leur activité bioturbatrice liée à la construction des terriers modifie la structure des sédiments et influe sur les flux mêmes des nutriments. En déterminant sa macroporosité, ils aèrent le sédiment hydromorphe des mangroves, favorisant ainsi les processus aérobies tels que la nitrification. Le volume dégagé par le forage des terriers augmente la capacité d'infiltration des eaux et favorise ainsi les possibilités d'échange entre l'eau interstitielle et le sédiment. D'autre part, en enfouissant et ingérant les feuilles de palétuviers tombées au sol, les crabes participent aux processus de décomposition de la matière organique, et contribuent à l'enrichissement en nutriments du sédiment. Enfin, la forte prédation sur les propagules est un facteur de pression important dans le recrutement des jeunes palétuviers, et contribue à la structuration de la végétation.

• **La végétation** joue également un rôle primordial dans (i) la circulation des eaux au sein de la mangrove par l'intermédiaire des perturbations induites par les troncs et les racines (Wolanski, 1992 ; Struve et al. 2003), (ii) la construction sédimentaire puisqu'elle augmente la stabilité du substrat vaseux et favorise le dépôt des matières en suspension (Wolanski, 1995 ; Furukawa and Wolanski, 1996) et (iii) la composition des sédiments via l'incorporation d'une partie de la litière (Betoulle et al., 2001). Composée d'espèces strictement adaptées à ce milieu, les palétuviers, la végétation est le compartiment structurant de cet écosystème, créant des niches écologiques diversifiées propices à la faune carcinologique. Les feuilles et les propagules des palétuviers sont une source de nourriture indispensable puisque de nombreuses espèces de crabes présents sont herbivores. Les autres espèces, détritvovores, s'en nourrissent également mais sous une forme dégradée. La grande consommation en eau et l'absorption racinaire importante des palétuviers leur confèrent un rôle de filtre vis-à-vis des nutriments dans le sédiment.



B. Prédilections épuratrices de la mangrove

Un des objectifs principaux de ce projet pilote était d'une part **d'évaluer les capacités épuratrices de la mangrove vis-à-vis des eaux usées domestiques**, d'autre part analyser l'impact de l'apport d'eaux usées domestiques sur l'écosystème. Nous discuterons successivement de ces deux aspects. Rappelons qu'en sortie de l'unité de traitement primaire, les effluents se caractérisent surtout par une teneur en éléments azotés et phosphatés importante et présentent une charge bactériologique élevée. Ils sont (normalement) dépourvus d'éléments traces métalliques.

• Les crabes, par leur activité bioturbatrice, développent la capacité d'infiltration des eaux usées facilitant la pénétration des effluents dans le sédiment. Ils augmentent ainsi la surface d'échange et la mise en contact avec les microorganismes jusqu'à 116% dans le faciès *Ceriops* et 228% dans le faciès *Rhizophora*. Ainsi, les processus de nitrification et dénitrification, par l'apport d'éléments azotés (nitrate et ammonium) et carbonés contenus dans les eaux usées domestiques, et par la mise en contact avec les bactéries spécifiques sont considérablement stimulés. A Malamani, la mangrove semble donc montrer de réelles dispositions de nitrification et dénitrification potentielles. Sur les premiers 55 cm, la mangrove est capable de dénitrifier potentiellement 2244 kg d'azote/ha/an dans le faciès *Ceriops* et 3638 kg d'azote/ha/an dans le faciès *Rhizophora*. La capacité journalière de dénitrification, est ainsi de 6 kg d'azote/ha/jour au moins pour le faciès *Ceriops* et de 10 kg d'azote/ha/jour environ pour le faciès *Rhizophora*. La pollution générée en azote total (NTK) par 400 EH estimée en phase avant projet était de 6 kg/jour pour 40 m³ et les analyses de l'effluent en sortie du décanteur réalisées depuis la mise en route du système confirment plus ou moins ces estimations. L'azote total mesuré varie entre 1 et 5,6 kg/jour (soit de 24 à 140 mg.l⁻¹, tableau 2.3), avec un apport en nitrate compris entre 32 et 56 g/jour (soit 0,8 à 1,4 mg.l⁻¹.j⁻¹, tableau 2.3). Il semblerait donc qu'à Malamani, un hectare de mangrove serait capable de prendre en charge efficacement la pollution azotée produite par jour, et en particulier dans le faciès *Rhizophora*. En effet, le rendement épuratoire du faciès *Rhizophora* est plus élevé que dans le faciès *Ceriops* sûrement dues à un ensemble de paramètres : le caractère moins réducteur du sédiment du faciès et sa texture plus fine, la surface d'échange sédiment-air plus grande, et une concentration bactérienne associée à ces processus (*Pseudomonas*, *Nitrobacter* et *Nitrosomonas*) plus importante. Mais la capacité potentielle nitrifiante-

dénitrifiante du sédiment de mangrove n'est pas le seul processus qui contribue à l'épuration des eaux usées. Si une partie de l'azote entre dans le processus de dénitrification, une partie est stockée dans le sédiment, comme le montrent les expérimentations de traçage isotopique, et une autre partie est absorbée par la végétation comme l'indique notamment le changement de coloration du feuillage des parcelles impactées. Nous avons montré que les palétuviers sont de grands consommateurs d'eau, ce qui implique une grande capacité d'absorption en eau et donc en nutriments contenus dans le sédiment. En effet, ils prélèveraient près de $11 \text{ m}^3/\text{j}$ dans le faciès *Ceriops* et $5 \text{ m}^3/\text{j}$ dans le faciès *Rhizophora* à l'échelle de la parcelle (soit $165 \text{ m}^3/\text{ha}$ et $76 \text{ m}^3/\text{ha}$ respectivement). Lors de notre expérimentation, l'apport d'eaux usées par parcelle représente $10 \text{ m}^3/\text{j}$. La végétation, surtout dans le faciès *Ceriops*, semble donc capable de contribuer de manière non négligeable à l'épuration du site, via la consommation en eau et nutriments azotés. De plus, la diminution de salinité qu'engendre l'apport d'eau usées domestiques, a tendance à accroître la consommation en eau de ces arbres et stimuler leur croissance générale (Wong et al, 1995, 1997).

C. Impacts potentiels des eaux usées domestiques sur la mangrove

Le second grand objectif de ces travaux consistait à analyser l'impact de l'apport d'eaux usées domestiques sur l'écosystème et à identifier d'éventuels effets indésirables sur la biodiversité composant la mangrove et sur son fonctionnement. Le suivi des 4 compartiments eau-sédiment-végétation-crabe réalisé à Malamani et plus particulièrement la comparaison entre les parcelles témoins et celles recevant des eaux usées domestiques depuis avril 2008, ont permis de caractériser les impacts dans chacun des compartiments, en conséquence de l'apport d'éléments nutritifs, de matière organique et d'eau douce contenu dans les effluents.

- La végétation est un bon révélateur de l'état de santé de la mangrove. Les analyses structurales ne présentent aucune différence significative si ce n'est celles dues à l'évolution naturelle des peuplements. En effet, la structure de la végétation, la diversité spécifique, la densité des individus et le taux de mortalité et de régénération analysés sont identiques à l'initial après 6 mois de rejets d'eaux usées sur les parcelles impactées. La hauteur des arbres, surface terrière, diamètre (D_{130}) des individus sont comparables entre les parcelles témoins et impactées. Ces résultats sont conformes aux observations rapportées par ailleurs dans les expérimentations du même type (Wong et al., 1995, Tam et al., 1995 ; Wong et al., 1997), qui suggèrent que l'apport d'eaux usées n'a pas d'effets indésirables sur la dynamique de la végétation. Cependant, des changements peuvent éventuellement se faire sentir après plusieurs années. Il faut donc envisager de poursuivre les suivis de la structure de la mangrove associés à ceux de la productivité, afin de confirmer ou non ces premières conclusions. En plus des résultats de traçage isotopique et de consommation en eau, les prises de vue aériennes du site d'étude, complétées par des observations sur le terrain de la dynamique de croissance des rameaux et des feuilles de palétuviers, révèlent l'impact évident des eaux usées sur les parcelles. Après 18 mois (mais visibles dès 6 mois après) de rejets d'eaux usées domestiques, les photographies aériennes (ULM) révèlent une coloration différenciée des parcelles impactées, vert plus intense que la végétation de mangrove non atteinte par les eaux usées. Sur le terrain, la comparaison de feuilles prélevées sur les parcelles impactées et sur les parcelles témoins équivalentes confirme ce changement de coloration, et révèle également une différence de taille. Ces résultats montrent bien que l'apport d'eaux usées engendre une augmentation de la croissance des palétuviers comme l'avait formulé Clough et al. (1983). Le processus de photosynthèse est considérablement stimulé par l'apport d'azote et d'eau douce et la teneur en pigment photosynthétique augmente significativement.

- Un des objectifs des travaux était de révéler d'éventuels changements de la composition spécifique et de l'abondance des communautés de crabes engendrées par l'apport des eaux usées domestiques. Les adaptations de la plupart des espèces face au mouvement des marées et aux contraintes qui y sont associées en font probablement des espèces aptes à supporter les stress induits par l'apport de pollutions organiques. Cependant, l'assemblage des communautés, l'abondance des espèces et le nombre de taxa semblent se modifier avec l'apport des effluents. Les tendances sont différentes selon les faciès de végétation et la microtopographie du sédiment. Les espèces dominantes restent les mêmes. La densité globale des individus semble diminuer dans les milieux où l'eau est plutôt stagnante comme le faciès *Ceriops* et au contraire, augmente dans le faciès *Rhizophora*. Les crabes semblent se réfugier sur les zones de buttes où la densité augmente.

- Au sein du compartiment sédiment, l'apport des eaux usées engendre aussi des modifications dans la composition chimique, et un suivi à plus long terme paraît bien sûr indispensable. En effet, d'une part les nitrates ont tendance à migrer dans l'eau de la nappe plus facilement que l'ammonium, et ce, de façon plus marquée dans le faciès R. D'autre part, le phosphore, s'accumule dans les couches inférieures (aux alentours d'1m de profondeur). Cette tendance est plus marquée dans le faciès C. Bien qu'une grande partie du phosphore apporté au milieu soit assimilé par les plantes, une partie s'associe au complexe argilo-humique et s'accumule en profondeur.

• Bien que la forte capacité de dénitrification du sédiment laisse penser que la mangrove peut absorber et dégrader l'ammonium et les ions nitrates avant qu'ils ne parviennent dans les eaux de la nappe, une accumulation de ceux-ci pourraient à terme la polluer. Associé à un excès de phosphore, aussi essentiel soit-il pour les activités biologiques, ces deux éléments peuvent entraîner de réels problèmes de pollution, induire des proliférations algales et des phénomènes d'eutrophisation.

• Les milieux salés sont des milieux hostiles pour la survie de la plupart des bactéries. Malgré cela, on constate une augmentation de la concentration en *E. coli* dans les parcelles où sont effectués les rejets, en particulier dans le faciès R. C'est le caractère plus ombragé (qui protège des UV) et moins salé du faciès R qui semble favoriser leur survie par rapport au faciès C.

• Bien que ces modifications n'aient, à court terme, provoqué aucune rupture fonctionnelle au sein de l'écosystème, il se pourrait qu'à plus long terme, des dysfonctionnements apparaissent. D'autres auteurs ont récemment mis en évidence des dérèglements structuraux et fonctionnels importants dans des mangroves soumises à des apports azotés et phosphorés importants, dérèglements pouvant aller jusqu'à la mort des peuplements (Lovelock et al. 2009).

• Enfin, il apparaît, selon certaines études, que le comportement des crabes peut se modifier avec l'apport d'eaux usées. Bartolini et al. (2009) ont montré par exemple, à partir d'expérimentation menées en mésocosme, que les crabes recevant des eaux usées semblent plus vite rassasiés, passent plus de temps dans d'autres activités telle que la défense territoriale, et diminuent leur activité bioturbatrice. En présence de macrofaune bioturbatrice, la matière organique est redistribuée, et cette modification à la fois physique et chimique a pour conséquence d'augmenter l'oxygénation du sédiment et le potentiel microbien (Kristensen et al., 1988). De même, Penha-Lopez et al. (2010) ont mis en évidence, en conditions de mésocosmes, une perturbation évidente de populations de *Terebralia palustris* (gastéropode associé aux mangroves) en présences de rejets d'eaux usées.

Conclusion générale

Ce travail de thèse aura permis d'une part d'étudier le fonctionnement global de la mangrove du site de Malamani et les relations qui existent entre ses différents compartiments (eau-sédiment-végétation-crabe) via les échanges de matière et les processus biogéochimiques (figure 7.1). D'autre part, cette étude aura permis d'établir le rôle de chacun de ces compartiments dans le processus de bioremédiation vis-à-vis des eaux usées domestiques. Enfin, elle met en avant de nombreux effets des eaux usées sur ces compartiments, et si elles ne provoquent pas de rupture fonctionnelle à ce jour, les investigations doivent être poursuivies sur un plus long terme.

Bien souvent, les études fondamentales sur les écosystèmes tels que la mangrove, ou celles plus appliquées relatives à des problématiques de pollutions, se focalisent sur un unique processus, ou un seul compartiment de façon à en comprendre le fonctionnement de la manière la plus précise possible. C'est en effet une approche indispensable pour détailler, mécanisme par mécanisme, le rôle de la biodiversité et de chacun des processus dans le fonctionnement d'un écosystème. Cependant, aucun des processus ni aucun des compartiments composant la mangrove ne fonctionne de manière isolée. Afin d'étudier les capacités bioremédiatrices d'un écosystème et/ou l'impact potentiel d'actions anthropiques, il est important d'avoir une vision plus large et d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement global de cet écosystème. La mangrove est un écosystème ouvert traversé par des flux d'énergie et de matière entre les différents compartiments. Soumis à de nombreuses interactions biotiques et abiotiques spécifiques au contexte tropical et côtier, le fonctionnement et la dynamique de l'écosystème mangrove sont complexes. L'interdépendance de la végétation structurante, des populations de crabes, du compartiment sédiment et du mouvement des eaux, rend cet écosystème particulièrement productif malgré les conditions salines, anoxiques et oligotrophes. La faune et la flore possèdent les adaptations indispensables à leur développement dans ce contexte de forte contrainte, leur permettant de contribuer à l'équilibre fonctionnel de l'écosystème. Pour conserver cet équilibre, aucun de ces compartiments ne doit subir de modifications importantes, qu'elles proviennent de perturbations globales (changement climatique et montée des eaux par exemple) ou locales (comme l'apport d'eaux usées domestiques).

L'ensemble des mesures et des expérimentations réalisées à Malamani au cours de ce travail montre de manière générale que la mangrove semble répondre aux exigences requises d'épuration des eaux usées domestiques. L'interaction des compartiments eau-sédiment-végétation-crabe est un phénomène central qui permet justement à la mangrove d'accepter une charge d'éléments nutritifs, de matière organique et d'eau douce sans provoquer *a priori* de rupture fonctionnelle au sein de l'écosystème. En effet, chacun des compartiments joue un rôle spécifique dans l'épuration de ces eaux usées provenant du propre rôle qu'il détient naturellement au sein du fonctionnement global de la mangrove. L'utilisation d'un tel procédé semble donc être bien adapté pour l'assainissement d'eaux usées domestiques provenant de lotissements ou de villages situés en bord de mangrove. Il permettrait, tout comme les systèmes de filtres plantés naturels, d'assainir des zones urbaines et périurbaines difficiles à relier à une plus grosse station d'épuration et cela à moindre coût, tout en prenant en compte la protection du lagon et la valorisation de la mangrove.

Cependant, si les premières conclusions obtenues après une étude de deux années de rejets (c'est-à-dire plutôt à court terme) paraissent encourageantes, il se peut qu'à plus long terme, certains aspects négatifs se révèlent. En effet, l'ensemble des résultats présentés dans ce travail montre que l'apport des eaux usées domestiques sur la mangrove influe sur son fonctionnement (photosynthèse, croissance) et que des changements sont constatés dans différents compartiments après deux années de rejets d'effluents. Les premières études concernant le pouvoir épuratoire de la mangrove ne révélaient aucune modification (Tam et al., 1995a ; Tam et al., 1995b), mais plus récemment plusieurs auteurs ont également mis en avant des effets négatifs des eaux usées sur les populations de crabes (Cannicci et al., 2009 ; Penha-Lopes et al., 2009), sur la végétation (Lovelock et al., 2009, Pi et al., 2010) ou encore sur la composition physico-chimique et les processus biochimiques du sédiment (Tam et al., 2009).

Ainsi, la mangrove paraît être adaptée pour un traitement secondaire des effluents domestiques dans un contexte tropical et insulaire. Les conclusions encourageantes à court terme ne doivent pas faire oublier certains aspects quant à l'impact des eaux usées sur la biodiversité de cet écosystème et les modifications dans son fonctionnement que cela pourrait engendrer à long terme. Avant d'utiliser un tel système de traitement d'eaux usées domestiques, il faut donc approfondir les recherches fondamentales et analyser les caractéristiques écologiques de la mangrove visée.

Perspectives de recherche

Avant de développer de façon opérationnelle un tel système de traitement d'eaux usées domestiques, des expérimentations complémentaires sont encore nécessaires. En effet, ces travaux mettent en avant différents points importants de l'impact des eaux usées domestiques sur la mangrove. Il est donc primordial de les prendre en compte et d'approfondir encore les recherches fondamentales selon divers axes, notamment le devenir du phosphore et de l'azote, l'impact des nutriments sur la végétation et sur les crabes à long terme, la surveillance de la qualité des eaux du lagon

- Il semble que ce type de dispositif d'assainissement soit efficace pour dégrader une partie de la pollution azotée, avec un procédé de diffusion adapté et une surveillance hebdomadaire. Par ailleurs, si la capacité de dénitrification potentielle des sédiments de mangrove paraît importante, elle doit être encore précisée pour l'ensemble des faciès de mangrove et dans différentes conditions : saison sèche vs saison des pluies, effet des différents coefficients des marées. En effet, les mesures réalisées durant de thèse ont été réalisées durant la saison humide et ne tiennent pas compte de la variabilité temporelle et climatique.

- Des études restent à mener également sur les pollutions phosphatées provenant des lessives, et détergents. En effet, un certain nombre de ces produits utilisés à Mayotte ne répondant pas aux normes sanitaires en vigueur en métropole. De la même manière que le traçage isotopique de l'azote provenant des effluents à été réalisé, un traçage et un bilan du phosphore est envisagé afin de mieux comprendre et, à terme, de limiter son accumulation dans les couches plus profondes du sédiment de la mangrove.

- Aussi, il serait primordial d'approfondir nos résultats sur les perturbations du comportement des crabes engendrées par les apports d'eaux usées ainsi que sur leur densité et leur répartition. Il serait nécessaire de multiplier les comptages et les observations dans le temps et l'espace, dans l'optique de connaître parfaitement chacune des espèces. En effet, leur migration ou leur disparition serait catastrophique puisque comme nous l'avons vu elles sont indispensables au bon fonctionnement de la mangrove.

Enfin il ne faut pas oublier en effet qu'il en va de la protection de la mangrove mais également des écosystèmes marins à commencer par le lagon. C'est pourquoi, en novembre 2008, le SIEAM et EcoLab ont sollicité l'ARVAM (La Réunion) pour la réalisation d'un état initial (biodiversité, paramètres physico chimiques) dans la zone lagunaire limitrophe de la mangrove, ainsi que dans l'ensemble de la baie de Bouéni. Estimer la surface et la couverture corallienne des fronts récifaux et la structuration des peuplements (peuplements coralliens dominants, couverture algale, faune benthique) sont des analyses essentielles pour caractériser une éventuelle dégradation/déstructuration des peuplements. Une expertise complémentaire est donc en cours afin de relever la géomorphologie et le paysage (tombant, surplomb, grotte, plaine sablo-vaseuse), la couverture en coraux, les espèces, genres ou familles dominantes de la faune benthique (hydrides, éponges, coraux au sens large, algues) et l'état de dégradation des peuplements et leur sensibilité aux apports organiques. Les paramètres physiques de l'eau de mer sont aussi analysées (température, salinité, matière en suspension, turbidité, la teneur en sels nutritifs la teneur en carbone organique totale (COT), la teneur en oxygène, et la teneur en chlorophylle. Pour cela, les stations d'études ont été positionnées de manière la plus pertinente vis à vis du rejet et des zones coralliennes. Toutes ces analyses permettent de caractériser le milieu lagunaire de manière qualitative et quantitative, ainsi que d'élargir l'étude de l'impact potentiel des eaux usées sur le lagon.

Recommandations techniques pour un tel système d'assainissement

Le choix du faciès de végétation :

Après cette étude, il semble que les deux faciès de végétation n'aient pas les mêmes prédispositions pour épurer les eaux usées domestiques. Le faciès à *R. mucronata* dominants, composé de grands arbres (7 à 10 m) dont la densité est relativement faible ($0,7 \text{ ind/m}^2$), abritant une faune carcinologique bioturbatrice, semble être le plus adapté à l'utilisation d'un tel procédé. D'une part, le rendement épuratoire dans ce faciès est plus important, la capacité de réception d'un volume d'eau est plus importante, et d'autre part, les changements et impacts apparaissent moins marqués que dans le faciès à *C. tagal* dominant (excepté l'impact bactériologique en *E. coli*). Par contre, il est vrai qu'en termes de faisabilité technique, ce profil de végétation est plus difficile d'accès à cause du réseau de racines échasses entremêlées, et souvent plus éloigné de l'arrière mangrove.

Les dimensions des parcelles réceptrices

Ces travaux ont permis de calculer la capacité de résorption en eau de la mangrove, en proposant un nouvel indice essentiel pour estimer le volume potentiel d'eaux usées domestiques pouvant être accepté par cet écosystème : l'indice CRE (ou *WRC*, pour *water resorption capacity*). Celui-ci dépend de plusieurs paramètres propres à cet écosystème : la capacité d'infiltration du sédiment, l'évapotranspiration de la végétation, et la bioturbation induite par les populations de crabes. Dans la mangrove de Malamani, il en ressort que le faciès *Cerriops* est capable d'absorber en moyenne $13,7 \text{ l.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ et le faciès *Rhizophora* $19,4 \text{ l.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$. Cet indice permet de dimensionner la taille des parcelles réceptrices des eaux usées domestiques. Selon l'estimation de l'indice CRE, une parcelle de 675 m^2 de mangrove serait capable d'absorber les 10 m^3 rejetés par jour, puisque cela correspond à une absorption moyenne de $14,81 \text{ l.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$. Pour une éventuelle application, il conviendrait de rejeter les eaux usées domestiques de la même manière, c'est-à-dire avec des canalisations espacées de 4 m l'une de l'autre et percées tout les deux mètres, sur une superficie de mangrove de 1000 m^2 pour 10 m^3 de rejet par jour (en prenant un CRE de $10 \text{ l.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$). Dans le cas d'un lotissement comme celui de Malamani où l'on a 400 EH qui rejettent 40 m^3 d'eau par jour, il faut donc mettre au

minimum en place 4 parcelles de 1000 m² de superficie afin d'absorber la quantité de rejets. Cependant, afin de bien dénitrifier la charge en azote rejetée, il est préconisé, au vue des capacité de nitrification et dénitrification mesurée, de quasiment doubler la surface et de rejeter les eaux usées sur 10 000m² (1 hectare) de mangrove (sous condition que les effluents aient une composition en élément azoté similaire à cette étude).

L'amélioration de l'unité de traitement:

En amont du rejet en mangrove, des améliorations peuvent être apportées à l'unité de traitement. En effet, le traitement primaire mis en place est efficace vis-à-vis de l'abattage des MES (70 % en moyenne) et de la DBO₅ (62 % en moyenne) puisque les valeurs légales minimales pour les décanteurs primaires sont de 50 % de réduction des MES, et 60% de la DBO₅. En revanche il n'a aucun impact sur la pollution azotée : l'absence de contact entre les boues contenues dans la partie digestion et l'effluent empêche toute activité de nitrification ou de dénitrification au sein du décanteur. De plus, les bactéries nitrifiantes ont besoin d'être oxygénées pour survivre dans l'installation. Mais, afin d'améliorer le système et compte-tenu des capacités dénitrificatrices de la mangrove, un lit bactérien peut être ajouté entre le décanteur et le bassin tampon (coût 30 k€ et un coût annuel de maintenance de 1170€, Louvet C., 2009). Ce module permettrait de nitrifier la totalité de l'effluent et à l'issue de ce traitement, la pollution azotée pourrait être éliminée de façon beaucoup plus efficace par le traitement secondaire en mangrove.

Un suivi régulier indispensable:

Bien que ce système de traitement semble être adapté aux contextes insulaires tropicaux du fait de sa mise en place moins lourde et de son cout moins élevé (estimation totale des travaux de l'unité de traitement et réalisation des travaux: 360 k€, détails en annexe), les moyens techniques et humains ne doivent absolument pas être négligés. Il est impératif qu'un personnel formé sur place soit en permanence en surveillance de façon à entretenir le système de traitement. Une surveillance du système et des analyses complètes et régulières des effluents (1 bilan 24h tout les mois) sont également indispensables.

Exporter ce système d'assainissement :

Il convient de rappeler qu'aucune rupture fonctionnelle n'a été observée à court terme, c'est-à-dire après deux ans de rejets, mais qu'étudier à plus long terme est encore nécessaire. Les quantités d'azote potentiellement acceptables par la mangrove estimées pour Malamani, ne doivent en aucun cas servir de valeur de références applicables à d'autres mangroves. Elles permettent de donner un ordre de grandeur de surface de mangrove nécessaire pour accueillir une telle pollution, mais doivent être reconsidérées en fonction de chacun des sites. En effet, chaque mangrove dans le monde est différente de par sa composition végétale et carcinologique, son fonctionnement hydrodynamique sa position géographique,. C'est pourquoi, il convient de rappeler que, l'ensemble des résultats plutôt encourageants quant à l'utilisation de la mangrove comme système de traitement final d'eaux usées domestiques, ont été obtenus dans le cadre d'une expérimentation strictement contrôlée, dans une mangrove dont le fonctionnement écologique et la dynamique ont été étudiés en amont. C'est pourquoi, il faut impérativement connaître et étudier le contexte local, les caractéristiques écologiques de l'écosystème pris en compte à des fins bioremédiatrices ainsi que la nature de l'effluent à traiter pour une telle application.

4.2 ANNEXE 2 : organisation du site de Malamani

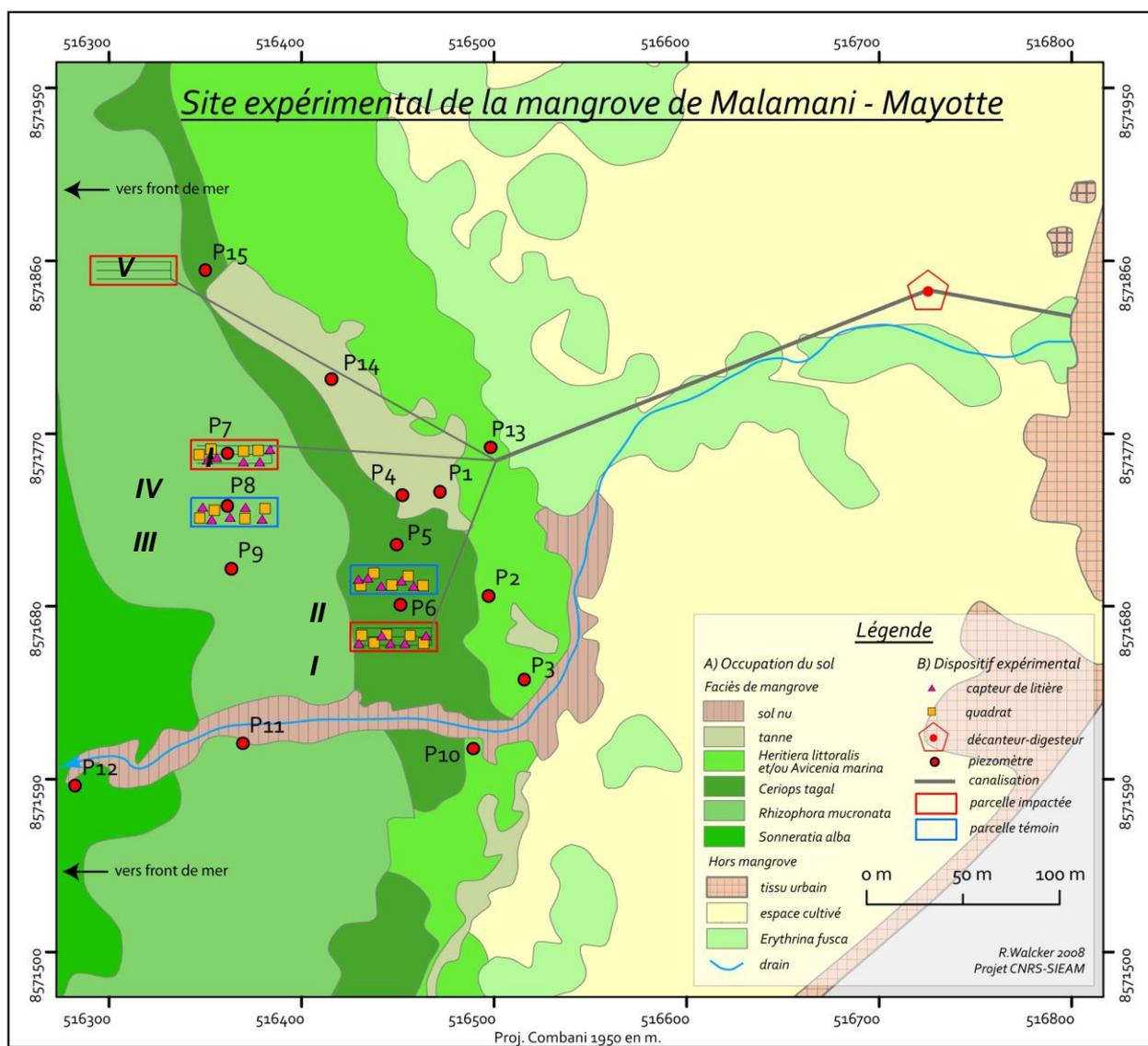


Figure 1 : organisation actuelle du site expérimental de Malamani

4.3 ANNEXE 3 : panneaux explicatifs

Mangrove et Bioremédiation. Un projet-pilote à Mayotte pour le traitement d'eaux usées domestiques.

M. Herteman¹, F. Fromard¹, L. Lambé¹, E. Muller¹, J.M. Sanchez-Perez¹, S. Sauvage¹, J.M. Amouroux², P. Juslak³, P. Lentz³

¹ ECOLAB - Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle, UMR 5245 (CNRS/Université Paul Sabatier - INPT), 29 rue Jeanne Marvig - 31055 Toulouse Cedex 04, France - herteman@clct.fr
² Laboratoire Arago 66650, Banyuls sur mer
³ SIEAM BP 289, ZI Kaweni, 97600 Mamoudzou, Mayotte

L'environnement à Mayotte

A Mayotte, territoire français de l'Océan Indien où l'environnement se dégrade avec l'augmentation rapide de la population, les mangroves constituent une interface obligée entre littoral en voie d'urbanisation et lagon menacé de pollution. La gestion des déchets est ainsi devenue pour l'archipel un problème majeur. Une seule station d'épuration équipe la capitale Mamoudzou et l'essentiel des eaux usées se déverse librement dans le lagon, sans traitement préalable. L'utilisation des mangroves dans le traitement naturel des eaux usées a été proposée comme une solution alternative efficace, applicable aux régions littorales tropicales où se développe cet écosystème.

Le rôle épurateur de la mangrove

Caractérisée par une dynamique forte et une productivité primaire élevée, la mangrove peut accepter un apport excédentaire de matière organique et de nutriments, sans déséquilibre biologique ni rupture fonctionnelle. Dans certains cas, une augmentation de la croissance et de la productivité peut être même observée. Des impacts négatifs sont cependant constatés pour des rejets chargés en métaux lourds, même si la mangrove montre une tolérance plus élevée que d'autres écosystèmes pour ces éléments. Si le rôle épurateur de la mangrove commence donc à être reconnu, les expérimentations *in situ* sont rares, se heurtant à une connaissance encore insuffisante de leur fonctionnement.



Un projet pilote

Dans ce contexte difficile, le SIEAM (Syndicat Intercommunal de l'Eau et de l'Assainissement de Mayotte) met en place un *projet pilote d'assainissement* basé sur les propriétés d'épuration naturelle de la mangrove. L'objectif est à la fois d'évaluer les capacités épuratrices de la mangrove de Mayotte vis-à-vis d'eaux usées domestiques et de contribuer à valoriser cet écosystème soumis à une forte pression anthropique. Ce projet a été confié au laboratoire ECOLAB spécialisé dans le domaine des interactions et du fonctionnement hydrobiogéochimique des interfaces eau/végétation/sédiment (notamment dans les mangroves). Centré sur ce sujet, une thèse a débuté en septembre 2006, soutenue par une bourse CIFRE (partenariat CNRS-SIEAM). Nous présentons ici le contexte de l'étude et les premières expérimentations engagées sur le terrain.



Faciès à *Rhizophora mucronata*

Faciès à *Ceriops tagal*



Un suivi sur trois ans

La végétation : structure, dynamique (croissance, régénération, mortalité), productivité (suivi des chutes de litières), analyses foliaires (concentration en nutriments, éléments minéraux).

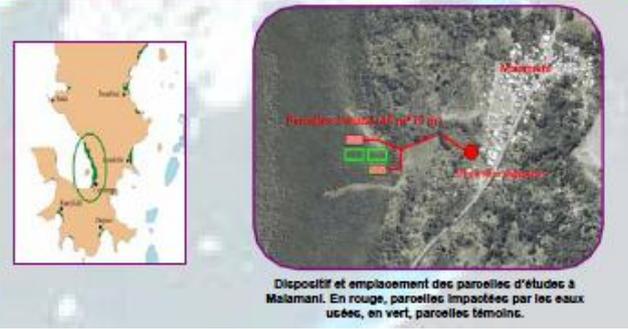
Le sédiment : capacité d'absorption et de dénitrification (potentielle et réelle) des sédiments en fonction du degré de bioturbation.

L'eau : circulation et composition des eaux. Mise en place d'un réseau de piézomètres équipés de sondes *Diver* (pression, conductivité, température). Interactions avec la dynamique des marées et les variations saisonnières.

Les populations de crabes, marqueurs fonctionnels essentiels de la mangrove (identification des populations, densité et structure des terriers, quantification de leur activité de bioturbation).

Dispositif expérimental

Les expérimentations sont conduites sur le site pilote de Malamani, sur lequel un *décanteur-digesteur* recevra des eaux usées domestiques. Ce système permet un traitement primaire de ces eaux, dépourvues en métaux lourds mais chargées en matière organique et nutriments. Un système de conduites forcées conduira ces rejets sur des parcelles mises en place en mangrove dans deux faciès structuraux différents représentatifs des mangroves de Mayotte: faciès à *Ceriops* en amont de la mangrove et faciès à *Rhizophora* en aval. A partir de ce réseau de placettes impactées par les eaux usées (volume et composition connus) et non impactées (témoins), l'impact de ces rejets sera suivi dans tous les compartiments de l'écosystème : végétation, eau, sédiment, faune en particulier populations de crabes.



Dispositif et emplacement des parcelles d'études à Malamani. En rouge, parcelles impactées par les eaux usées, en vert, parcelles témoins.

« Les Ingénieurs aux pinces vertes » : le rôle facilitateur des crabes dans les processus de bioremédiation en mangrove.

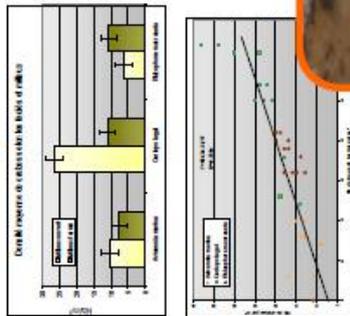
M. Herteman¹, F. Fromard¹, L. Lambs¹, J.M. Sanchez-Perez¹, J.M. Bouchard², J.M. Amourou³, ¹ EcoLab CNRS, Toulouse - ² U. Avigo, Banyuls sur mer - ³ Avigo, Banyuls sur mer
 Contact: herteman@cict.fr

CONTEXTE

• Dans le cadre du projet conduit actuellement à Mayotte qui vise à apprécier les impacts induits par des rejets d'eaux usées domestiques sur la mangrove, nous montrons ici l'interdépendance du système crabe-mangrove et son importance dans les processus de bioremédiation à travers leur activité de bioturbation.

• Cette étude s'articule autour d'une analyse des populations de crabes (diversité spécifique, densité des individus et des terriers, rôle dans la prédation et l'herbivorie) dans l'objectif de montrer comment cette activité de bioturbation joue un rôle considérable dans le fonctionnement de l'écosystème via la **facilitation des interactions** entre les compartiments eau-sédiment-végétation.

1. Analyses des populations



- 13 espèces ont été recensées sur le site d'étude dont 9 sont réparties sur les faciès de mangrove dominés par les palétuviers *Rhizophora mucronata* et *Cerriops tagal*.
- Elle appartient aux familles Grapsidae et Ocypodidae
- Densité moyenne:
 Faciès à *Rhizophora*: 13 crabes/m²
 Faciès à *Cerriops*: 19 crabes/m²

3. Bioturbation

Des moulages de galeries de crabes ont été réalisés grâce à l'introduction d'une résine époxy dans les orifices dans le but de déterminer le volume et la surface d'échange qu'ils créent.



Moulage en résine époxy de galerie de crabes



Cerriops

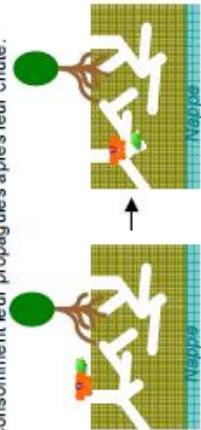
- Nombre de trous et nombre de crabes sont en corrélation: présence d'en moyenne deux trous pour un crabe.

•Galeries:

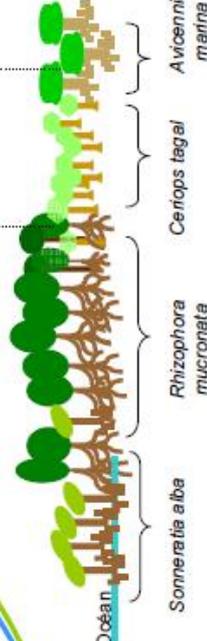
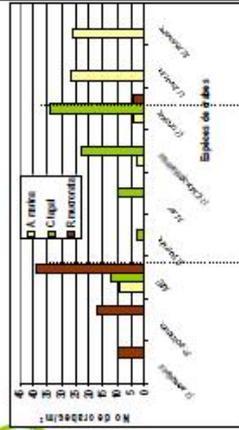
Structure complexe interconnectée entre 0 et 40 cm de profondeur.
 Volumes des galeries:
 Faciès à *Rhizophora*: 69,8 l.m⁻³ - Faciès à *Cerriops*: 36,7 l.m⁻³
 Surface d'échanges:
 20,6 m² de surface d'échange en profondeur pour 50 cm² au sol dans les *Rhizophora* (soit 400% d'augmentation).

•Prédation et herbivorie:

Les feuilles de palétuviers tombées sur le substrat vaseux de la mangrove sont rapidement enfouies par les crabes au fond de leur galeries. Ils exercent aussi une forte pression sur le développement des jeunes palétuviers car ils consomment leur propagules après leur chute.



2. Répartition dans la mangrove



Sonneratia alba *Rhizophora mucronata* *Cerriops tagal* *Avicennia marina*

• La mangrove s'organise en différents faciès successifs, parallèles au trait de côte, dominés par une espèce de palétuviers répondant aux exigences écologiques de chaque milieu.

• 6 espèces de crabes sur 9 sont strictement inféodés à un faciès donné. Il existe une zonation horizontale chez les crabes de l'océan vers l'arrière mangrove.

DISCUSSION

• Les populations de crabes jouent un rôle capital dans la structure et le fonctionnement global d'une mangrove. Ce sont de véritables **espèces ingénieurs** au sein de cet écosystème particulier. Grâce à leur activité de bioturbation, la micro-topographie du substrat et la structure des sédiments sont modifiées de manière importante.

• Dans la mangrove, milieu saturé en eau et souvent peu perméable, le réseau interconnecté de leurs galeries permet l'infiltration des écoulements de surface en profondeur. Ce réseau facilite aussi le mélange entre eau douce et eau de mer, favorise le drainage des racines de palétuviers et permet l'enfouissement des feuilles de la litière et l'enrichissement des sédiments en matière organique.

• C'est ainsi que les crabes interviennent dans les **mécanismes d'échanges** entre les compartiments eau, sédiment et végétation de la mangrove, au niveau des cycles du carbone et de l'azote, de l'oxygénation du sol, et de la circulation des eaux de nappe et de marée.

Financements du projet: Contrat SIEAM-Mayotte - Projet Ingénierie écologique 2007-2008 - Thèse sur bourse CIFRE (ANRT-SIEAM).

Mangrove et bioremédiation : efficacité socio-écologique d'un dispositif d'épuration des eaux usées à Mayotte

Becerra S. (CR CNRS LMTG), Herteman M. (Doctorante ECOLAB), Fromard F. (CR CNRS ECOLAB), Lambs L. (CR CNRS ECOLAB), Muller E. (IR CNRS ECOLAB), Sánchez-Perez J. (DR CNRS ECOLAB), Sauvage S. (IR CNRS ECOLAB).

Contexte environnemental à Mayotte

A Mayotte, territoire français de l'Océan Indien, l'environnement subit de plus en plus les effets conjugués de l'augmentation très rapide de la population et de l'arrivée de la société de consommation. Ici, les mangroves constituent une interface obligée entre un territoire sous pression démographique, un littoral en voie d'urbanisation et le lagon de fait, menacé de pollution. La capacité de cet écosystème, caractérisé par une dynamique forte, une productivité primaire et une biomasse élevées (Fromard et al. 1998, 2004), à accepter un excès de nutriments apportés par des eaux usées a été vérifiée notamment pour des mangroves asiatiques ou australiennes (Kelly 1995, Tam and Wong 1995, 1999).

Le SIEAM (Syndicat Intercommunal de l'Eau et de l'Assainissement de Mayotte) et le CNRS ont récemment mis en place un *projet pilote d'assainissement* basé sur les capacités épuratrices naturelles de la mangrove (site de Malamani).



Un projet de recherche interdisciplinaire :

Evaluer et d'utiliser les capacités épuratrices de la mangrove pour traiter les eaux usées domestiques (bioremédiation) sur un site pilote

Caractériser les effets d'eaux polluées prétraitées sur la mangrove

Analyser les conditions sociales et politico-institutionnelles de mise en œuvre d'un système d'assainissement alternatif

Evaluer son acceptabilité sociale en relation avec les usages de la mangrove et les pratiques traditionnelles de traitement des eaux usées



Premiers résultats

- écologiques

Les sols limoneux-vaseux des mangroves ont une perméabilité très faible, voir nulle. C'est uniquement grâce au terrier de crabes que les eaux de surface peuvent s'infiltrer

Macro-porosité des terriers déterminée par le biais de moulages en résine dans différents faciès de végétation de mangrove ; inventaire des crabes,

Evaluation de la capacité d'absorption des palétuviers sous serre par lysimétrie



Cadre expérimental

Les expérimentations sont conduites en mangrove, sur un site pilote où un décanteur-digesteur reçoit des eaux usées domestiques du lotissement de Malamani. Ce système permet un traitement primaire de ces eaux, dépourvues en métaux lourds mais chargées en matière organique et nutriments (en particulier en éléments azotés). Des canalisations conduisent ensuite ces rejets sur des parcelles mises en place en mangrove dans deux faciès structuraux différents représentatifs des mangroves de Mayotte: faciès à *Cerriops* en amont de la mangrove et faciès à *Rhizophora* en aval. A partir de ce réseau de placettes impactées par les eaux usées (volume et composition connus) et non impactées (témoins), la capacité épuratrice de la mangrove à Mayotte vis-à-vis de ces eaux usées domestiques est évaluée et l'impact de ces rejets est suivi dans tous les compartiments de l'écosystème : végétation, eau, sédiment, faune en particulier populations de crabes.

Centré sur cette étude, une thèse en écologie a débuté en septembre 2006, soutenue par une bourse CIFRE (partenariat CNRS-SIEAM). Une thèse en sociologie, soutenue par un co-financement CNRS-SIEAM, sera lancée en octobre 2008 sur la problématique de la politique d'assainissement à Mayotte.



- sociologiques

A Mayotte, planification récente en matière d'assainissement (2000) dans un contexte de croissance urbaine incontrôlée et de vulnérabilité sociale

Décalage entre compétences transférées au Syndicat des eaux et de l'assainissement (SIEAM), moyens réels et réalisations effectives

Sur le site pilote, dispositif d'assainissement expérimental accueilli favorablement malgré quelques résistances au changement de pratiques (l'utilisation des installations traditionnelles persiste chez certains ménages)

Perception de l'assainissement sur le registre du confort et de la propreté plutôt que dans une logique sanitaire

Faible valorisation sociale de la mangrove qui explique en partie l'acceptabilité sociale du dispositif de bioremédiation



Congress "Ecological Engineering: from Concepts to Applications" (EECA), 2-4 December 2009, Paris



Mangrove ecoremediation: a relevant solution for wastewater treatment in tropical areas ?

M. Herteman^{1,2}, F. Fromard¹, L. Lambs¹, J.M. Sanchez-Perez¹, E. Muller¹, S. Sauvage¹, R. Walcker¹, P. Jusiak²
¹ EcoLab UMR 5245 (CNRS-UPS-INP), Toulouse - ² SIEAM, Mayotte
 herteman@cict.fr – francois.fromard@cict.fr – lambs@cict.fr

I. Background

- The use of mangrove swamps in natural treatment of domestic wastewater is actually proposed as an alternative solution applicable to the tropical littoral regions. Characterized by high productivity, the mangrove trees have a natural ability to absorb excess nutrients, without any apparent functional or structural disturbances.
- Mayotte, French Island of Indian Ocean, is surrounded by a vast lagoon and sheltered by mangrove forests. Due to an important increase of its population, Mayotte is characterized by a strong degradation of the environment, associated to production and diffusion of wastewater in the lagoon without any treatment.
- In this context, a pilot project was designed with a double aim,
 - to estimate domestic wastewater remediation capacities of the mangrove swamp.
 - to protect this ecosystem with strong ecological and patrimonial value.

II. Study area and experimental pilot site



Fig. 1: Mayotte Island, Comoros Archipelago, and the study area, near Malamani village.



Fig. 2: Experimental site with 4 plots (45m x 15m) installed in 2 representative mangrove facies, respectively dominated by *Ceriops tagal* and *Rhizophora mucronata* species: 2 control plots and 2 plots impacted with domestic wastewater driven by a web of pipe.

• A primary treatment station (decanter and storage tanks, system-control of volumes and discharges) receives domestic wastewaters. Pretreated wastewaters are transported by a pipeline towards experimental plots in mangrove stands (Wastewater concentration (mg L⁻¹): NH₄ = 84.5, NO₂ = 0.45, NO₃ = 0.01, P_{TOT} = 8.4).

• Wastewaters are poured every two low tide. Time delivery and discharge volumes are controlled by SOFREL processing system (corresponding to 400 equivalent-inhabitants): 10m³.day⁻¹ wastewaters are received on each impacted plots, since April, 2008.

• Since October 2006, the analysis of biogeochemistry and ecology functioning within 4 interlinked compartments: **vegetation, crabs, sediment and water.**



Decanter and storage tanks



Pipe installation in *R. mucronata* facies

III. Main results

Dynamics and functioning of crab populations



Crab burrow architecture in *C. tagal* and *R. mucronata* facies; moldings in polyester resin.

	Width (cm)	Height (cm)	Depth (cm)	Number of burrows (m ⁻²)
Orange	3.7	3.4	0.27 ± 0.04	49 ± 5
Red	0.3	0.5	0.91 ± 0.05	32 ± 3

Table 1: Crab burrow parameters in *C. tagal* and *R. mucronata*

• Crabs, considered as **engineer species** for mangrove ecosystem, dig a dense network of galleries, modifying by this way the hydrodynamics. Burrows facilitate the circulation of wastewater in the substratum and increase (approx.400%) exchange surfaces.

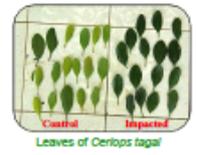
• Thus, wastewater impact on crab populations may potentially affect the whole ecosystem functioning.

• After one year of experiment, structure and functioning of crab populations were not modified by wastewater supplies.

Impact of wastewater on mangrove vegetation



Impacted plots



Leaves of *Cerriops tagal*



Secondary branches of *Cerriops tagal*

• Impacted plots can be distinguished from control plots on aerial photos by a **dark green color**.

• The comparison of leaves sampled within impacted and control plots confirms this change of hue.

• The growth of young branches is increased on impacted plots

• Within impacted plots, leaf areas and young branches growth increased as well as photosynthetic efficiency and pigment concentration.

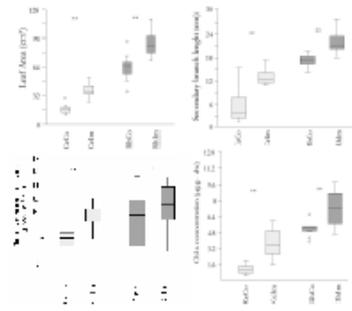


Fig. 3: Impact of wastewaters on leaf area and growth (n=30), photosynthesis efficiency (n=48 to 92), gas exchange measurements and pigment concentration (n=12, HPLC analysis) in October 2009, 18 months with refusal.

Ce: *Cerriops tagal*; Rh: *Rhizophora mucronata*; Co: control; Im: Impacted.

Nitrogen in leaves, sediment and water

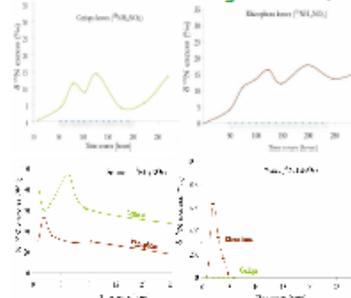


Fig. 5: ¹⁵N values on *R. mucronata* and *C. tagal* leaves (n=4), soil (n=4) and piezometric water (n=4) after enrichment with ¹⁵NH₄NO₃ in function of time. Blue points on X axis indicate the periods of high tide inundation.

• The kinetic of nitrogen compounds brought by wastewater in mangrove ecosystem was analyzed through ¹⁵N isotopic tracing (watering of mangrove plots with wastewater enriched with ¹⁵NH₄NO₃ and NH₄¹⁵NO₃).

• NO₃ and NH₄ concentrations and ¹⁵N isotopic abundance were studied over time in groundwater, sediment and mangrove trees. The kinetic of the inorganic nitrogen uptake in mangrove trees was determined through leaf analyses.

• Sediment retains NH₄ due to clay negative charge. The decreasing of NH₄ in sediment could be explained by absorption by mangrove trees.

• The NH₄ concentrations measured in piezometric water show an absence of lixiviation of NH₄ into the groundwater.

IV. Discussion

• After 12 to 18 months of experiment, the supply of domestic, pretreated wastewater on mangrove ecosystem results in an **increase** of mangrove trees growth and pigment concentration, correlated with a better photosynthetic efficiency.

• The structure and activity of crab populations, **engineer species** for mangrove ecosystem, do not seem to be affected by wastewater supplies. The analysis of nitrogen kinetic through ¹⁵N isotopic tracing shows that nitrogen is effectively absorbed by mangrove trees (*C. tagal* and *R. mucronata*), preferentially under the form of NH₄, which is the major form in domestic wastewater.

• Taking into account these results and other data and experiments not presented here (water and sediment analyses, bacteriological characterization), the efficiency of mangrove ecosystem for domestic wastewater treatment seems to be **efficient** on the short term (12-18 months of wastewater discharge in mangrove plots).

• Additional experiments and long term survey are required to fully evaluate the effectiveness of impact and the remediation capacity of mangrove ecosystem.

Contract SIEAM-Mayotte 2008/2009 - Ecological Engineering Program, CNRS 2007 and 2008
 PhD grant supported by CIFRE-ANRT and SIEAM