



**Programme**  
**« Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain »**

**Action A10**  
**Rapport final**

**Valorisation des eaux usées par lagunage  
dans les pays en voie de développement**

**Bilan et enseignements pour une intégration socio-économique viable.**

Centre d'Enseignement et de Recherche Eau Ville Environnement,  
centre conjoint de l'ENGREF, de l'ENPC et de l'UPVM

**mars 2003**

Martin SEIDL  
Jean Marie MOUCHEL



avec un financement de :



en collaboration avec  
EIER, UAM, Aquadev, CENHICA



**COPYRIGHT © 2003**

CEREVE, Centre d'Enseignement et de Recherche Eau Ville Environnement,

CEREVE, ENPC  
6 – 8 Avenue Blaise Pascal  
Champs sur Marne  
77455 Marne la Vallée Cedex 2  
[www.enpc.fr/cereve](http://www.enpc.fr/cereve)

Fax: +33 1 64 15 37 64

Tél.: +33 1 64 15 39 75

## SOMMAIRE

<b>1. Contexte</b>	<b>2</b>
1.1. Programme	2
1.2. Historique du projet	2
1.3. Contexte africain	2
1.4. Partenariat cubain	3
1.5. Valeur ajoutée du partenariat mis en place	3
<b>2. Le cadre du projet</b>	<b>5</b>
2.1. Volet action de recherche	6
2.2. Volet action pilote	6
2.3. Volet transversal	6
<b>3. Etat de l'art synthétique</b>	<b>7</b>
3.1. Les techniques	7
3.1.1. Contexte du projet	7
3.1.2. Le lagunage à microphytes et à macrophytes	7
3.1.3. Les macrophytes, exemple des lentilles d'eau	9
3.2. Valorisation	9
3.3. Valorisation et risques sanitaires, position	10
<b>4. Efficacité du lagunage en Afrique et à Cuba</b>	<b>11</b>
4.1. Méthodologie des enquêtes	11
4.2. Synthèse des résultats des enquêtes	13
4.2.1. Capacité et rendement	13
4.2.2. Coûts et exploitation	17
4.3. Exemple de la station pilote de l'UAM de Niamey	20
4.3.1. Description du système	20
4.3.2. Résultats obtenus sur la station pilote de l'UAM	21
4.4. Conclusions	24
<b>5. Réutilisation</b>	<b>25</b>
5.1. Méthodologie des enquêtes de terrain	25
5.2. Résultats des enquêtes de terrain	25
5.2.1. Potentiel des sous-produits	26
5.2.2. Caractérisation des promoteurs agricoles	27
5.2.3. Statut foncier	28
5.2.4. Perception des promoteurs de sous-produits	29
5.2.5. Financement de l'accès aux sous-produits de l'épuration : avis des promoteurs agricoles	29
5.2.6. Les contraintes rencontrées	30
5.3. Méthodologie pilote	30
5.3.1. Résultats pilote	31
5.4. Conclusions	32
<b>6. Les échanges</b>	<b>34</b>
6.1. Programme	34
6.2. Séminaire	34
<b>7. Conclusions et perspectives</b>	<b>36</b>
<b>8. Documents produits</b>	<b>36</b>
8.1. Publications scientifiques	37
8.2. Mémoires des étudiants ayant participé au projet	37
8.3. Rapports produits par les partenaires	37
<b>9. Liste de références utilisées</b>	<b>38</b>

## Fiche de synthèse

**Durée du projet :**

décembre 2001 - mars 2003

**Intitulé action A10 :**

Valorisation des eaux usées par lagunage dans les pays en voie de développement

- Bilan et enseignements pour une intégration socio-économique viable
- Lagunage à macrophytes comme moyen d'*autofinancement* du traitement des eaux usées

**Thème :**

Assainissement – Valorisation et traitement des déchets liquides

**Zones concernées :**

Burkina, Niger, Cuba, Afrique de l'Ouest

**Partenaires :**

- ❑ CEREVERE : Centre d'Enseignement et de Recherche Eau Ville Environnement, centre conjoint de l'ENGREF, de l'ENPC et de l'UPVM, Paris – France
- ❑ EIER : Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural, Ouaga - Burkina Faso
- ❑ UAM : Université Abdou Moumouni, Niamey – Niger
- ❑ AQUADEV : ONG, Niamey Niger
- ❑ CENHICA : Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas, La Havanne - Cuba

**Hypothèse de départ :**

La production et la commercialisation de sous-produits de traitement des eaux usées domestiques par lagunage, comme l'eau recyclée riche en nutriments, la biomasse végétale produite et les boues de curage peuvent couvrir au moins, partiellement les coûts du traitement, et améliorer la durabilité des systèmes de traitement.

**Objectifs :**

L'objectif du volet recherche était d'évaluer les performances épuratoires d'une dizaine de systèmes de traitement des eaux usées par lagunage en Afrique de l'Ouest et à Cuba **et** leurs possibilités de valorisation des sous-produits.

L'objectif du volet pilote était de tester en petite échelle, le traitement des eaux usées par lagunage à l'aide de la Lentille d'eau, telle que pratiqué à Cuba, mais adapté aux conditions africaines. L'objectif était double : rendement épuratoires combiné avec la production de biomasse utile en vu de sa commercialisation directe ou indirecte.

L'objectif du volet transversal était d'enclencher et de stimuler les réflexions et les échanges entre les partenaires autour de la réutilisation des eaux usées dans les pays en voie de développement. La collaboration dans le cadre de ce projet devra aider à poser une base d'un nouveau réseau de connaissance.

**Financement :**

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

**Programme cadre :**

Gestion durable de déchets et de l'assainissement urbain piloté par Programme Solidarité Eau ([www.pseau.org](http://www.pseau.org)) et Partenariat pour Développement Municipal ([www.pdm-net.org](http://www.pdm-net.org))

# 1. Contexte

## 1.1. Programme

Le projet "Valorisation des eaux usées par lagunage dans les pays en voie de développement" fait partie du programme intitulé "Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain". Ce programme est piloté par un comité rassemblant des représentants du Ministère des Affaires Etrangères, de l'Agence Française de Développement, du PDM et du pS-Eau. Un comité scientifique rassemblant des personnalités reconnues pour leur compétence sur les thèmes de l'assainissement ou des déchets dans les pays en développement est chargé, dans le cadre de ce programme, du suivi d'une dizaine des projets individuels.

Les objectifs du programme sont a) d'élaborer des méthodologies d'intervention pour la mise en œuvre de solutions durables aux plans socioculturels, technico-économique, environnemental, sanitaire, institutionnel et juridique et b) de développer les échanges autour de ces méthodologies et c) de promouvoir ces méthodologies auprès des décideurs, des opérateurs et des bailleurs de fonds.

Le programme repose sur la mise en œuvre de deux types d'actions : des actions de *recherche* et des actions *pilotes*. Actions de recherche et actions pilotes traitent des même sujets, mais les démarches et les objectifs spécifiques sont différents. Le programme fait appel à la *recherche* pour approfondir les connaissances, les valider, les compléter ou les amender, sur des aspects jusqu'ici insuffisamment étudiés de la gestion des déchets solides et liquides dans les pays en développement. Les actions *pilotes* ont pour objectif de tester en vraie grandeur de nouvelles voies et hypothèses afin d'en analyser les contraintes et les potentialités.

## 1.2. Historique du projet

Le projet d'action pilote et de recherche dans sa forme actuelle était issue de trois projets différents soumis initialement au comité de pilotage, le projet EIER pour évaluer les performances épuratoires des stations de lagunage en Afrique de l'Ouest et Centrale en vue de proposer un cahier technique pour la conception et l'exploitation - gestion des stations de lagunage, le projet Aquadev - UAM, étant une extension du projet de recherche en épuration et valorisation des eaux usées et des produits dérivés au Niger et le projet CEREVERE - CENHICA concernant l'intégration de l'épuration des eaux usées dans un système d'agriculture urbaine permettant d'autofinancer le traitement.

Le projet final coordonné par l'équipe du CEREVERE intitulé " Valorisation des eaux usées par lagunage dans les pays en voie de développement " possède ainsi deux volets : un volet de recherche intitulé "Bilan et enseignements pour une intégration socio-économique viable" et gérée par l'EIER et le volet pilote intitulé " Lagunage à macrophytes comme moyen d'autofinancement du traitement des eaux usées " géré par Aquadev.

Ce projet a été financé par Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

## 1.3. Contexte africain

Les villes des pays en voie de développement sont soumises d'une part à une expansion démographique forte et d'autre part aux conséquences de l'exode rural. Ces facteurs augmentent la consommation d'eau et les besoins de gestion des rejets d'eaux usées. La pression démographique sur le sol autorise de moins en moins l'élimination des excréta et des eaux usées par les techniques de l'assainissement individuel. L'environnement urbain et les récepteurs naturels deviennent de plus en plus fragiles et demandent une plus grande protection contre les pollutions.

Les conditions économiques difficiles en Afrique de l'Ouest rendent peu probables la mise en place rapide d'équipements publics suivant le modèle d'assainissement collectif des pays industrialisés. Les

politiques nationales de décentralisation donnent la responsabilité de l'assainissement aux communes. Sachant que ces dernières ont généralement peu de revenus, les possibilités de mobilisation de ressources pour le développement puis la gestion de l'assainissement deviennent encore plus rares. En conséquence, le lagunage relativement peu onéreux, et avec un rendement économique amélioré grâce à l'utilisation de la biomasse végétale produite, peut constituer une alternative crédible pour le traitement des eaux usées en zone urbaine en Afrique de l'Ouest.

L'utilisation différenciée de plusieurs types d'eau est déjà un réflexe acquis dans les pays africains. Citons simplement la distinction entre l'eau de pompe (potable) pour l'alimentation et l'eau de puits (rarement potable en région urbanisée) pour le lavage et le nettoyage. La réutilisation de l'eau usée, non traitée, pour les potagers en milieu urbain est déjà une pratique fréquente malgré les risques pour la santé publique. Nombreuses sont les expériences avec des lagunes pilotes, mais tous les enseignements à en tirer n'ont pas été synthétisés.

Un système qui couple épuration des eaux et production agricole s'inscrit dans une meilleure gestion de l'écosystème, d'une part par le recyclage de l'eau et d'autre part par la récupération et la transformation d'éléments nutritifs en biomasse utile. Un système agro-sanitaire propose non seulement un traitement des eaux usées à bas prix avec des investissements limités, mais il peut devenir financièrement autosuffisant. Il repose sur une technicité accessible à la plupart des pays en voie de développement tout en respectant l'environnement. Les avantages apparaissent non pas seulement au niveau de l'écosystème, mais aussi sur le plan socio-économique par la création d'emplois dans le secteur de l'agriculture urbaine.

#### **1.4. Partenariat cubain**

Cuba se situe à la même latitude que le Sénégal, mais possède un climat plus humide, comparable à celui de la Côte d'Ivoire. Cuba, est une île avec un sous-sol perméable et un léger excédant hydrographique et connaît par ce biais périodiquement des pénuries d'eau. Avec plus de 80% de la population urbaine desservie en eau potable et environ la moitié raccordée au service d'assainissement la consommation d'eau est presque trois fois plus élevée que dans les pays africains.

Les cubains possèdent un degré de formation élevé et une très bonne expérience dans le domaine d'assainissement. La situation socio-économique a favorisé le développement de systèmes efficaces et peu coûteux. La quasi-totalité du traitement des eaux usées se fait dans les systèmes de lagunage naturel ou aéré (plusieurs centaines sur l'ensemble du territoire). Les gestionnaires et les chercheurs cubains ont ainsi pu tester l'intégration du traitement d'eaux usées dans un système agricole en utilisant la lentille d'eau. La collaboration cubaine a ainsi permis d'acquérir cette connaissance et de tester la viabilité de ce concept sur le continent africain. En pratique il s'agit d'un transfert de connaissance de Cuba vers le Niger facilité par l'équipe coordinatrice.

#### **1.5. Valeur ajoutée du partenariat mis en place**

EIER ➡ UAM : L'EIER possède 10 ans d'expérience dans la gestion d'une station de lagunage, tandis que l'Université de Niamey vient d'en créer une nouvelle et a besoin d'une expertise de proximité. Pour la mise en route de laboratoire des techniciens de l'UAM se sont ainsi déjà formés à l'EIER. Dans le cadre du projet, des chercheurs de l'EIER se déplacent à Niamey pour échanger avec leurs confrères nigériens et pour se rendre compte de possibilités de recherche de la station de l'UAM.

UAM ➡ EIER : Pour renforcer les liens entre les deux entités africaines, des stagiaires de l'EIER collaborent aux travaux du volet pilote à la station expérimentale de Niamey et à la collecte des données pour les enquêtes du volet de recherche. Cet échange est l'illustration pratique des possibilités pédagogiques de la station de UAM.

CENHICA ➡ UAM : L'expérience de lagunage avec la Lentille d'eau a été inspirée par l'expérience de CENHICA à Guyaba. Grâce à la collaboration de l'équipe cubaine la même technologie a pu être appliquée au Niger.

EIER ➡ CENHICA : Les réflexions menées sur une meilleure maîtrise des dimensions socio-économiques de la réutilisation des eaux usées en Afrique aide à développer meilleure conscience

écologique dans d'autres pays en voie de développement comme Cuba, ce qui pourra entraîner le développement de nouveaux projets d'épuration intégrée.

Le CEREVE fonctionne comme un catalyseur des échanges. Les missions à Ouagadougou et à Niamey permettent de mieux connaître les partenaires et leur contraintes locales et pour mettre en place en cadre d'échange. Un rôle particulier de coordination est joué dans la phase de finale du projet, à laquelle tous les partenaires ont participé.

## 2. Le cadre du projet

Le projet se divise en trois volets, un volet « action de recherche », un volet « action pilote » et un volet « transversal ». Le volet action de recherche porte sur l'évaluation des systèmes existants, leur rendement et leurs possibilités d'autofinancement, le volet action pilote étudie les possibilités pratiques de l'utilisation des Lemnacées en Afrique et le volet transversal valorise les collaborations par la mise en place d'un réseau d'échange des connaissances.

Le groupe de travail du projet est constitué de 5 équipes multidisciplinaires du Nord et du Sud. La coordination est effectuée par l'équipe du CEREVERE.

Le CEREVERE assiste d'une part l'équipe de l'EIER dans la mise en place du volet de recherche et d'autre part aide avec le CENHICA, l'équipe d'UAM /Aquadev pour la mise en place du protocole du volet pilote. La mission de terrain a permis principalement d'évaluer les difficultés du terrain et de mettre en place les travaux expérimentaux. Le CEREVERE est chargé du suivi des deux volets, de la restitution d'un rapport final du projet et notamment de l'analyse et d'évaluation des résultats des expérimentations au Niger.

L'EIER porte la responsabilité du volet de recherche et notamment de la tenu de 4 missions d'enquête et l'élaboration d'un rapport analytique sur les aspects techniques et socio-économiques.

Aquadev porte le volet de recherche et notamment la bonne conduite des expérimentations par l'UAM et est responsable de la restitution des données brutes.

Le CENHICA expertise les opérations menées à Niamey et élabore de son coté un rapport sur les aspects techniques et socio-économiques de lagunage à Cuba.

Le travail et les moyens alloués sont ainsi partagé entre les 5 équipes : 40% pour l'EIER, 30% pour le CEREVERE, 20% pour UAM /Aquadev et 9% pour le CENHICA. Les résultats sont exploités par toutes les équipes ensemble et en proportion du travail effectué.

Tableau 1 : Déroulement du projet

2001/2003	CEREVERE	EIER	CENHICA	UAM / Aquadev
Novembre /décembre	étude bibliographique, conception des formulaires d'enquêtes et du protocole de manipulation au Niger	contacts des équipes collaborant à l'enquête		
Janvier	mission Ouagadougou	échange UAM / EIER		conduite du projet pilote (mesures bi-journalières) et restitution des données brutes
Février	et Niamey			
Mars	suivi du volet pilote		Demandes d'autorisation et collection des données	
Avril				
Mai		Mission Ghana, Sénégal, Cote d'Ivoire et Cameroun,		
Juin	traitement des données de la partie pilote et préparation du séminaire			
juillet / août	préparation du séminaire			
Septembre	préparation du séminaire de lagunage et restitution du projet	Préparation du séminaire		
Octobre				
Novembre		séminaire de lagunage et atelier de restitution à Ouagadougou réception des contributions de CENHICA et UAM/AQUADEV		
Janvier	Rapport de synthèse	Transmission du rapport final	-	-

## **2.1. Volet action de recherche**

Le volet de recherche a pour objectif l'évaluation des performances épuratoires d'une dizaine de systèmes de traitement des eaux usées par lagunage en Afrique de l'Ouest et à Cuba et leurs possibilités de valorisation des sous-produits. En pratique il s'agit d'évaluer la compatibilité des usages faits des sous-produits de l'épuration avec la quantité et la qualité de ces derniers à partir d'exemples pratiques. Pour atteindre cet objectif, une enquête de terrain a été conduite, elle permet de :

- connaître les systèmes locaux, insuffisamment décrits dans la littérature
- mettre en évidence les contraintes de fonctionnement, de maintenance et de gestion des différents systèmes
- évaluer les possibilités de valorisation des sous-produits de lagunage.

Les résultats de toutes les enquêtes sont présentés dans un rapport synthétique sous forme de recommandations pour la conception et l'exploitation / gestion des stations de lagunage à micro et macrophytes en situation africaine.

## **2.2. Volet action pilote**

Le traitement des eaux usées domestiques, peut être financé au moins en partie significative par la commercialisation de la biomasse produite. La commercialisation des plantes aquatique utilisées dépend essentiellement de leur valeur nutritionnelle. Plus elle est élevée, mieux les végétaux remplacent les produits traditionnels dans l'alimentation du bétail, de la volaille ou en pisciculture. Des systèmes avec la lentille d'eau, une plante endémique dans la majorité des pays du monde, ont donné de très bons résultats entre autres à Cuba, où les essais ont été menés par notre partenaires le CENHICA. L'objectif principal du projet est de tester à petite échelle, sous conditions africaines, le traitement des eaux usées par lagunage à macrophytes utilisant la Lentille d'eau. L'objectif est double : évaluer le rendement épuratoire d'un système produisant de la biomasse et démontrer son utilisation directe en pisciculture.

## **2.3. Volet transversal**

L'objectif du volet transversal est d'enclencher et de stimuler les réflexions et les échanges entre les partenaires autour de la réutilisation des eaux usée dans les pays en voie de développement. La collaboration dans le cadre de ce projet devra aider à poser les bases d'un nouveau réseau de connaissance.

## 3. Etat de l'art synthétique

### 3.1. Les techniques

#### 3.1.1. Contexte du projet

Les villes d'Afrique de l'Ouest et du Centre connaissent un taux de croissance de la population particulièrement élevé : Dakar, Ouagadougou et Yaoundé (5% à 7% par an), Niamey (4,3% par an), Kumasi (3,3% par an). La crise économique et la non-maîtrise de l'urbanisme sont les principaux facteurs de dysfonctionnement de développement urbain. La situation des services publics, en particulier de l'eau et de l'assainissement, est plus qu'alarmante. Si l'approvisionnement en eau potable s'est sensiblement amélioré dans plusieurs villes africaines durant les décennies 1980 – 2000, il n'en est pas de même pour l'assainissement collectif. Le taux de desserte est relativement faible. Malgré les efforts consentis par les gestionnaires pour réaliser des systèmes d'égout dans les grandes agglomérations, on relève toujours moins de 30% des ménages raccordés à Abidjan et à Dakar, 5% à Kumasi, 2% à Yaoundé et Douala et que 0.5% à Niamey. Le reste des ménages se répartissent entre les systèmes autonomes tels que les latrines traditionnelles (50% des ménages de Kumasi et 58% à Niamey), les latrines améliorées type VIP (10% à Kumasi et 18% à Niamey), les fosses septiques (26% à Kumasi et 11% à Niamey) et le milieu naturel (9% Kumasi et 11% à Niamey). Diverses études des systèmes de traitement des eaux usées ont révélé que les technologies intensives qui représentaient 76% des stations construites en Afrique francophone en 1993, sont inadaptées du fait du coût d'exploitation élevé, de la non-disponibilité des pièces de rechange, du manque d'expérience et de la non-appropriation technologique du personnel en charge de la gestion de ces systèmes (CIEH, 1993). L'abandon de ces ouvrages est ainsi constaté dans beaucoup des villes. Par exemple, sur les 10 stations à boues activées que compte Yaoundé 9 sont hors service (Wéthé, 1999).

#### 3.1.2. Le lagunage à microphytes et à macrophytes

Le traitement des eaux usées domestiques est devenu un des problèmes majeurs dans les pays en voie de développement, principalement dû à l'explosion démographique et à l'urbanisation (UNEP 1997). Le lagunage classique est une méthode bon marché aux endroits où l'espace est disponible à bas prix. Les bassins de lagunage fonctionnent comme des écosystèmes avec des relations de symbiose entre les différentes populations composées de bactéries, de champignons, de rotifères, d'algues, de poissons, de plantes, etc.. On distingue le lagunage à microphytes ou lagunage naturel et le lagunage à macrophytes. Dans les bassins de lagunage à microphytes, l'épuration est essentiellement basée sur l'action symbiotique entre les populations d'algues et de bactéries. Cependant certains problèmes persistent notamment dans la cas d'une trop forte concentration de matières en suspension dans l'effluent. De meilleurs résultats peuvent être obtenus par lagunage à macrophytes. En effet, l'utilisation des macrophytes comme Eichornia, Typha et Phragmites peut améliorer significativement la qualité de l'effluent (Reddy et al, 1987 ; Brix et al, 1989; Sekiranda et al, 1998), mais leur biomasse ne produit guère de bénéfices supplémentaires. L'effet épuratoire est dû principalement à la faculté de ces plantes d'extraire les éléments nutritifs de la colonne d'eau et au support que leurs racines et feuilles offrent aux microorganismes susceptibles de dégrader les matières organiques et nitrifier l'azote ammoniacal. De surcroît, la couverture de la surface d'eau limite le développement d'algues microscopiques difficiles à décantier, crée un milieu propice pour décantation des matières organiques et du plancton et diminue l'évaporation (Oron et al, 1987), ce qui est un point largement positif lorsque l'eau traitée est considérée comme une ressource. L'effet sur la dégradation de la matière organique passe principalement par la création d'une zone de rhizomes servant comme support pour le biofilm pouvant dégrader (Korner et al 1998). Cet effet est cependant minimisé par la diminution de la ré-aération de la colonne d'eau. Par contre, l'ombrage de l'eau dû à la présence des macrophytes

diminue fortement la quantité de rayonnements UV qui atteignent l'eau et l'efficacité épuratoire vis à vis des espèces pathogènes indicatrices (coliformes et streptocoques).

En Afrique, alors que le lagunage à microphytes est bien connu des laboratoires et des centres de recherche dans le paysage africain, le lagunage à macrophytes n'a été introduit que depuis 1989 et fait l'objet de plusieurs études sur pilotes depuis. Les expériences sont réalisées sur des stations recevant des eaux usées issues d'internats, de casernes, d'usines ou de groupes d'habitation de haut standing avec des consommations d'eau jusqu'à 175 l/j/personne (EIER, Kone 1999). Les résultats seront différents pour les eaux domestiques plus concentrées en raison de plus faibles consommations d'eau (moins de 60 l/j/personne dans certaines villes d'Afrique). Alors que l'élimination des MES est meilleure dans le lagunage à macrophytes, des résultats obtenus au Burkina montrent un meilleur rendement dans le lagunage à microphytes en ce qui concerne les bactéries pathogènes, 4 unités logarithmiques d'abattement pour le lagunage à microphytes contre 2 unités dans la station à macrophytes EIER (Guene 1989, Kone 1999, Humbert 2000).

Tableau 2 : Principaux résultats rapportés dans la littérature scientifique et technique concernant des lagunes à Lemnacées.

Pays		Cuba	Israël	Pays - Bas	Bangladesh	Thaïlande
Effluent		Elevage	domestique	domestique	domestique	Domestique
Echelle		Réelle	pilote	pilote	réelle	Pilote
Auteur		Santiago 1997	Steen 1998	Vermaat 1998	Alaerts 1996	Edwards 1992
Lagune	Compartiments	1?	10	1	5	1
Lagune pour le	profondeur (m)	0.5	0.3	0.05	0.4 - 0.9	- 1.2
culture	superficie (m <sup>2</sup> )	3 000	0.24 (7*)	0.02	6 000	200
Débit	(l/pers/jour)			batch	78 (2 500)	batch
	(l/s)	< 0.1 <sup>(3)</sup>	1.7 10 <sup>-3</sup>		2.3 - 3.2	0.001
Temps de séjour	(j)	> 100	4.2 (global)		20.4	> 100
Influent/	PH	7.4 7.4	7.8 7.9		7.5 7.5	-
effluent	(µS/cm)	2960 1000	- -		- -	-
	(mg-NH <sub>4</sub> -N/l)	143 9	48 24		9.3 0.5	941 TKN
	(mg-NO <sub>3</sub> -N/l)	- -	- 2		0.03 0.05	-
	(mg-PO <sub>4</sub> -P/l)	56 9	17 10		2 0.4	119 TP
	(mg-COD-O <sub>2</sub> /l)	1098 740	132 49		250 25	-
	(mg-BOD-O <sub>2</sub> /l)	378 30	- -		- -	-
	(mg-MES/l)	1420 94	37 11		120 12	19300
	(nr/100ml)	10 <sup>5</sup> 10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> 10 <sup>3</sup>		- -	-
Charge en DBO	(kg-O <sub>2</sub> /ha.d)	1.8		-	48 - 60	-
Perte d'azote						
Volatilisation	(%)		73	-	-	-
Prod. primaire	(%)		18	34	43	4 - 27
Sédimentation	(%)		6	-	7	-
Nitrification	(%)		3	-	-	-
Espèce		Lemnacées	Lemna g.	Lemna g.	Lemna g.	Lemnacées
Composition des	(g-N/kg <sub>sec</sub> )	36 <sup>(2)</sup>	59	22 - 38	47 <sup>(4)</sup>	35 - 52
Lemnacées	(g-P/kg <sub>sec</sub> )	6 <sup>(2)</sup>		5.7 - 8.8	9.3 <sup>(4)</sup>	4 - 6
	protéines. (% <sub>sec</sub> )	25-27		-	-	24 - 28
Biomasse	10 <sup>3</sup> (kg <sub>w.w.</sub> /ha)				16	-
Assimilation	(kg-N/ha/j)	2.5		0.12 - 5.9	2.6	-
	(kg-P/ha/j)	0.4			0.5	-
Production	(kg <sub>d.w.</sub> /ha/j)	59 <sup>(2)</sup>	74 - 164		58 - 105	27 - 57
	(kg <sub>w.w.</sub> /ha/j)	590 - 680			715 - 1200	
d.w./w.w.	(%)			10	8.1	
C:N:P					40:5:1	88 :10 :1 <sup>(5)</sup>

(1) porcherie, <sup>(2)</sup> hypothèse : teneur en eau = 90%, <sup>(3)</sup> apport supposé de 1.73 kg COD/j et 0.55 kg BOD/j  
<sup>(4)</sup> calculé à partir du bilan (table 2, Vermaat 1998), <sup>(5)</sup> calculé à partir de valeurs moyennes

### 3.1.3. Les macrophytes, exemple des lentilles d'eau

La lentille d'eau contient beaucoup d'éléments nutritifs comme des protéines et des vitamines et, contrairement à beaucoup d'autres plantes aquatiques, elle possède l'avantage de ne contenir que très peu de fibres et peut, grâce à sa petite taille, être facilement récoltée. La matière sèche des Lemnacées peut contenir 20 à 35 % de protéines (Edwards et al 1992; Mbagwu et al, 1988). Plus la teneur en azote dans l'eau est élevée, plus la biomasse contiendra de protéines (Edwards et al 1992, Oron, 1994). La lentille d'eau peut être trouvée naturellement dans le monde entier et se compose de quatre genres Lemna, Spirodela, Wolfia et Wolfiella. Ils ont tous une structure très simple des feuilles ovales de quelques millimètres, disposées sur le plan d'eau avec un système de racines de la même taille sans tronc distinct. Les lentilles ont une production de biomasse élevée, qui peut être améliorée par la technique de culture et éventuellement par l'addition des fertilisants (Skillicorn et al., 1993). C'est probablement Lemna qui convertit le mieux les nutriments (Bergman et al 2000). La biomasse produite peut constituer un excellent aliment pour les poissons, la volaille ou le bétail (Haustein et al., 1990 et 1994; Skillicorn, 1993). Les tests montrent que la lentille d'eau peut remplacer une grande partie des aliments habituels dans l'élevage des volailles et peut même améliorer la qualité du produit final (Haustein et al, 1990). La culture de lemnaées peut ainsi constituer une incitation financière pour le développement d'activités de traitement des eaux usées. Le Tableau 2 apporte des éléments techniques sur le fonctionnement de lagunes à lentilles d'eau dans le monde.

### 3.2. Valorisation

Le traitement des eaux usées par lagunage est préconisé depuis plus de deux décennies pour les pays d'Afrique, comme une technologie adaptée à leurs conditions socio-économiques à leur climat et à cause de son caractère rustique ne nécessitant que peu de technicité en comparaison avec les technologies de traitement intensives du type boues activées ou culture fixée. On peut dresser plusieurs constats sur le lagunage en Afrique :

- L'exploitation et la gestion de ces stations se heurtent à d'énormes difficultés de prise en charge.
- Plusieurs stations de lagunage sont à l'abandon ou fonctionnent mal à cause d'une mauvaise conception ou d'un manque d'adéquation avec le contexte social ou institutionnel.
- La réutilisation des eaux usées n'est que depuis peu considérée comme une composante essentielle dans la stratégie pour une gestion intégrée des ressources en eaux en Afrique.
- Les études n'ont pas encore donné lieu à des « cahiers techniques » dont les projeteurs et les exploitants pourraient s'inspirer.
- L'utilisation de la biomasse végétale, comme Pistia Stratiotes pour divers usages en particulier dans la fabrication de compost ou dans celle des aliments pour volailles, pouvant financer l'exploitation n'ont pas été évaluée en Afrique jusqu'à présent.

L'usage le plus courant des eaux usées en Afrique de l'Ouest est l'arrosage de cultures maraîchères malgré les risques sanitaires (Cisse, 1997) pratiqué par des populations défavorisées pour lesquelles cette pratique génère des ressources financières importantes (Camara 1997). La fabrication de compost, réutilisables en cultures maraîchères, est une voie de valorisation possible de la biomasse des lagunes à macrophytes.

Cependant, force est de constater que cette réutilisation ne suffit pas à garantir le succès à long terme des traitements par lagunage en Afrique. Ces systèmes ne semblent donc pas suffisamment intégrés ou perçus comme indispensables localement pour être maintenus. Ceci pose la question de la valeur ajoutée de la réutilisation dans les différents contextes où des lagunes ont été installées. Par ailleurs, étant donné les risques sanitaires liés à une réutilisation inadéquate des eaux traitées par lagunage, les pratiques locales de réutilisation et la perception des risques par les utilisateurs doit être évaluée.

Les Lemnacées sont une alternative possible et différente. Un système opérationnel du type Lemnacées, à l'échelle réelle et unique au monde, est exploité au Bangladesh depuis 1990 et traite les eaux usées d'environ 2000 à 3000 personnes (Alearts et al 1996, Skillicorn et al., 1993). Le système

de lagunes y a été exploité pendant une période de quatre ans sans problèmes avec utilisation de la biomasse produite en pisciculture. Les Lemnacées ont été étudiées dans des nombreuses stations pilotes (Oron et al., 1987; Zirschky and Reed, 1988, Edwards et al., 1992; Oron, 1994; Van der Steen et al., 1998; Vermaat et al 1998). Toutes les études ont montré leur grand potentiel de croissance et d'accumulation des nutriments en combinaison avec un bon rendement épuratoire. Le lagunage avec des Lemnacées est très utilisé dans le sud des Etats Unis, principalement comme traitement tertiaire (Zirschky et al., 1988). Une méthode de récolte mécanisée a été mise en oeuvre par la société Lemna technologies pour récupérer et disposer la biomasse sur les grandes cultures (Riggle, 1998).

### **3.3. Valorisation et risques sanitaires, position.**

Les questions sanitaires liées à l'intégration de sous-produits de l'épuration dans la sphère d'activité d'un grand nombre de personnes ou dans la sphère marchande ne doivent évidemment pas être négligées. Elles ne sont pourtant pas au centre de ce travail qui est centré sur la faisabilité technique et économique de sa réutilisation. L'OMS propose des normes sanitaires depuis des décennies et elle est en passe de les modifier pour les rendre plus sévères et diminuer les risques sanitaires. Pourtant, ces normes sont aujourd'hui extrêmement loin d'être appliquées en Afrique où l'utilisation d'eaux usées brutes pour le maraîchage est une pratique hélas courante, faute de développement suffisant de l'épuration. Le chemin du développement est long, l'échelle doit être montée échelon après échelon (Anderson et al., 2001), et les normes sanitaires doivent accompagner l'ascension. Bien que le développement passe par le développement du marché et la distribution des produits à une échelle éventuellement vaste, y compris les produits agricoles, il nous semble qu'une étape actuelle concerne le développement local de l'assainissement. Sa viabilité technique et économique dans la société urbaine africaine est aujourd'hui un point tout à fait fondamental. Les solutions praticables, pouvant améliorer significativement la situation des populations, ne doivent pas être sacrifiées au nom de deux principes qui risquent de s'opposer à ces développements en imposant des règles trop strictes, et qu'on peut énoncer ainsi d'une manière très raccourcie :

- les populations des pays en voie de développement ont le même droit à la santé et à un environnement de qualité que celles des pays développés, les mêmes règles sanitaires doivent donc être appliquées systématiquement ;
- le développement passe par les échanges commerciaux internationaux, les produits agricoles des pays en voie de développement doivent donc être produits avec les mêmes normes sanitaires et normes de qualité que ceux des pays développés.

Nous sommes convaincus que ce type d'arguments presque malthusiens est en fait irréaliste et nuit même à un développement qui doit être progressif et avoir des retombées locales rapides. Sans négliger ces objectifs généraux qui devront être atteints dans le futur, la situation actuelle appelle des solutions appropriées définies au travers d'une échelle de normes appropriées. C'est clairement dans cet état d'esprit qu'a été entrepris le travail décrit dans ce rapport.

## 4. Efficacité du lagunage en Afrique et à Cuba

### 4.1. Méthodologie des enquêtes

Pour permettre aux chercheurs et aux enquêteurs de récupérer facilement et systématiquement des données un formulaire d'enquête d'évaluation des systèmes de traitement (annexe 1) a été élaboré par le Cereve en collaboration avec l'EIER. Le formulaire d'enquête comporte trois parties :

- Fiche I : Identification et exploitation, concernant les paramètres de gestion et d'exploitation
- Fiche II : Données techniques, identifiant aussi bien le dimensionnement de la station que le rendement épuratoire
- Fiche III : Valorisation des sous produits, qui évalue la présence d'une demande en eau recyclée auprès de différents groupes d'utilisateurs et d'autre part la demande en biomasse ou en boues séchées.

Les formulaires ont été envoyés au gestionnaire et exploitant pour être remplis. Une petite contrepartie financière a été prévue pour la restitution de l'enquête et l'aide à la tenue des "focus groups" destinés à évaluer la demande et les pratiques en matière de réutilisation. Une étude bibliographique devrait permettre de comparer, vérifier et compléter les données la ou nécessaire.

L'étude du CIEH (1993) sur les systèmes d'épuration collectifs dans le contexte africain étant la seule étude sur ce sujet a formé le point de départ de la sélection des stations de lagunage. Une liste non exhaustive des stations de lagunage dans les pays cités ci-dessus a été élaborée avec les agences locales d'exploitants et des institutions de recherche ONAS (Sénégal), SODECI (Côte d'Ivoire), WRI (Ghana), l'Université de Yaoundé I (Cameroun). Cette liste a formé l'échantillon de départ dont une quinzaine de stations a été sélectionnée pour être visitées, et dont un sous échantillon de 5 stations a fait l'objet d'évaluation approfondie par le biais des "focus groups".

Les critères de sélection étaient :

- traitement d'eaux usées domestiques (et non pas d'effluents industriels)
- valorisation effective ou potentielle des sous produits (effluent traité, biomasse végétale ...)
- taille > 500 équivalents habitants
- possibilité d'entretien avec des "focus groups" ;
- possibilité de trouver auprès des structures de recherche associées au projet le maximum de données concernant la réalisation et le suivi des stations ;
- accessibilité géographique de la station pour respecter les délais et les contraintes budgétaires du projet
- possibilité de transformation du système existant en un système avec macrophytes type Lemna (Cuba)

Cuba possède plusieurs centaines de stations de lagunage dont la plupart est en état de fonctionnement. La réutilisation ne se pratique qu'au niveau des effluents et seulement pendant la saison sèche quand les ressources en eau sont insuffisantes. Les chercheurs de CENHICA ont sélectionné environ 5 stations selon les critères cités ci-dessus dans un périmètre de 30 kilomètres autour de la capitale. A cette liste a été ajoutée la station de Cayo Largo, une petite île avec un besoin fort en eau pendant la saison touristique.

L'étude a porté finalement sur 19 stations d'épuration par lagunage construites dans six pays africaines et 5 stations à Cuba.

Les stations africaines peuvent être divisées globalement en trois groupes :

1. les stations construites pour la recherche qui ne traitent que quelques m<sup>3</sup>/j. Ce sont les sites expérimentaux de Cambérène (MHEA), de l'Université de Niamey (UAM) et de l'EIER (2) à Ouagadougou.
2. les stations couplant simultanément les objectifs de recherche et de traitement des eaux usées. Ce sont en générale des stations initialement construites pour traiter les eaux usées auxquelles ont été greffés par la suite des objectifs de recherche. Dans cette catégorie on regroupe les stations de l'EIER (1) et de Biyem Assi à Yaoundé.
3. les stations dont la vocation de base est essentiellement le traitement des eaux usées produites dans une zone. Onze stations sur les seize étudiées appartiennent à ce groupe, dont 5 en Côte d'Ivoire (Daloa, Dabou A, Dabou B, Bouaké, Gbapet), 3 au Ghana (Akossombo, Tema ancienne et nouvelle) et 6 au Sénégal (Saly Portudal, Louga, Saint Louis Rufisque et Niayes). Ce sont dans l'ensemble des stations à microphytes.

Chaque station est décrite en détail dans la monographie des stations de lagunage réalisée par l'EIER et remise conjointement à ce rapport.

Dans ce rapport l'échantillon correspond cependant au 16 stations. L'ONAS du Sénégal n'ayant pas fourni à ce jour les données des stations Niayes, Rufisque Castor et Rufisque Diokoul. Le pourcentage est ainsi exprimé par rapport n = 16, sauf mention particulière. Il faut garder en mémoire que presque 20% de cet échantillon est constitué de stations de recherche ne correspondant aux critères habituels de gestion et d'exploitation. Ces stations ont été incluses dans l'échantillon de base à cause de la richesse des données existantes sur ces sites, tant sur les plans techniques que socio-économiques.

L'équipe de l'EIER était chargée de la collecte des données d'après des organismes d'assainissement en Afrique ainsi qu'auprès d'autres structures de recherche participant et d'exécuter des missions de reconnaissance de collecte des données techniques et socio-économiques dans les pays sélectionnés (voir Tableau 3).

Tableau 3 : Les stations de lagunage retenues par l'EIER dans le cadre de ce projet

Pays	Nom de la station	Ville	type rejet	traitement	Focus gr.
Burkina Faso	EIER 1 – microphytes	Ouagadougou	campus école	+	+
Cameroun	Biyem Assi II	Yaoundé		+	+
Côte d'Ivoire	Campus I & II	Bouaké	Campus	+	+
Côte d'Ivoire	Dabou A	Dabou		+	+
Côte d'Ivoire	Dabou B	Dabou		+	-
Côte d'Ivoire	Daloa CHR	Daloa	Centre Hospitalier	+	-
Côte d'Ivoire	Gbapet	Gbapet	Huilerie de palme	+	-
Ghana	Akossombo	Akossombo		+	-
Ghana	New West Tema	Accra	Municipal	+	-
Ghana	West Tema	Accra	municipal	+	+
Sénégal	Castor	Rufisque		+	+
Sénégal	Diokoul	Rufisque		+	-
Sénégal	Louga	Louga		+	-
Sénégal	Niayes	Niayes		+	-
Sénégal	Saint Louis	Saint Louis		+	+
Sénégal	Saly Portudal	Saly Portudal		+	-
Burkina Faso	EIER 2 – macrophytes	Ouagadougou	campus école	recherche	-
Niger	UAM	Niamey	campus université	recherche	+
Sénégal	Cambérène – MHEA	Dakar		recherche	+

L'équipe cubaine a collecté les données techniques auprès de divers ministères cubains (Tableau 4). Le seul cas de réutilisation des sous-produits à Cuba concerne un système d'agriculture urbaine avec une

lagune pilote à lentille d'eau, instaurée par le ministère de la défense à Guyaba et décrite plus loin dans ce rapport. Aucune donnée socio-économique n'a pu être collectée à Cuba en raison du contexte économique très particulier du pays.

Tableau 4 : Echantillon des stations par lagunage échantillonnée à Cuba

Pays	Nom de la station	Ville	type rejet	Traitement	donnée flux	Donnée qualité
Cuba	Los Breezees	Havane	hôtel	+	+	+
-"	Guardalavaca	Holguín	Plage	+	+	+
-"	Estero Ciego (vieja)	Holguín	Plage	+	+	+
-"	Estero Ciego (nueva)	Holguín	Plage	+	+	+
-"	Los Taínos II	Varadero		+	+	+
-"		Guyaba	Porcherie / Culture lemna	+	+	+
-"	ESBEC	Havane		+	-	+
-"	Paris	Havane	Ecole	+	-	+
-"	Cine	Havane	Ecole	+	-	+
-"	La Espanola	Havane	Usine de conserves	+	-	+
-"	La Habanera	Havane	Usine de conserves	+	-	+
-"	19 de abril	Havane	Usine de conserves	+	-	+
-"	Caribe	Havane	Usine de conserves	+	-	+
-"	Batabanó	Havane	Usine de conserves	+	-	+
-"	San Antonio	Havane	Abattoir	+	-	+
-"	Camacho	Havane	Porcherie	+	-	+

## 4.2. Synthèse des résultats des enquêtes.

Les données ont été rassemblées dans le cadre du volet recherche dans la monographie des stations en Afrique de l'Ouest, dont le rapport complet accompagne ce document.

### 4.2.1. Capacité et rendement

Les eaux usées traitées sont principalement d'origine domestique ou du secteur agroalimentaire, une seule station dessert le milieu hospitalier. Ceci implique que la plupart des effluents ne contiendront pas les micropolluants pouvant limiter leur réutilisation en agriculture. Les stations ont été conçues sur les mêmes principes : un ouvrage de prétraitement (75% des cas) suivi par un bassin anaérobie et le(s) bassin(s) facultatif(s) à microphytes. Les modèles de Mc Garry ou de Marais (voir Mara et Pearson, 1998) ont servi de base de dimensionnement de 44% des stations (EIER, Téma ancienne et nouvelle, Akossombo, Yaoundé, Bouaké et Dabou A&B). Ces modèles s'appuient sur la charge journalière en DBO<sub>5</sub> et de coliformes fécaux à traiter. Pour ces stations, on note la présence de trois étages de bassins de stabilisation :

- le bassin anaérobie ou bassin de décantation primaire, qui assurent le traitement primaire. Quinze stations comportent, avec éventuellement des ouvrages complémentaires de prétraitement, ou des ouvrages de décantation pour le traitement primaire ;
- les bassins facultatifs qui assurent le traitement secondaire. Ce type de bassins est présent dans toutes les stations, en dehors de la station de Cambarène-MHEA ;
- les bassins de maturation, sont également présent dans toutes les stations conçues selon les modèles de Mc Garry ou de Marais.

Pour les cinq autres stations (Saly Portudal, Louga, Saint Louis, Niamey et Daloa), aucune information n'a été obtenue sur les modèles ayant servis pour le dimensionnement, bien que les ouvrages visités laissent croire à l'utilisation, lors de la conception des stations, des modèles de Mc Garry ou de Marais.

L'étanchéité des bassins de stabilisation est renforcée, surtout au niveau des digues, dans 14 des stations visitées (en dehors de Saint Louis et de Biyem Assi). Les fonds de ces types de bassins sont en général en argile compactée. Les techniques et les matériaux les plus utilisés pour ce renforcement sont les suivants :

- le béton armé utilisé dans 8 stations (Dabou A&B, Bouaké, Gbapet, Daloa, Tema ancienne, EIER2 et Louga) où la couche de béton est située au-dessus d'une couche d'argile,
- la « bonne terre » (ou latérite) compactée à l'optimum proctor, couplée à une couche d'argile dans 5 sites (Saly Portudal, Yaoundé, EIER1, Akossombo et New Tema) dotés en outre d'un géomembrane au-dessus de laquelle est disposée une couche d'argile.

Les effluents s'écoulent d'un bassin à un autre, de manière gravitaire dans toutes les stations étudiées. La plupart de stations sont dotées d'un dispositif de by-pass et de déversoirs.

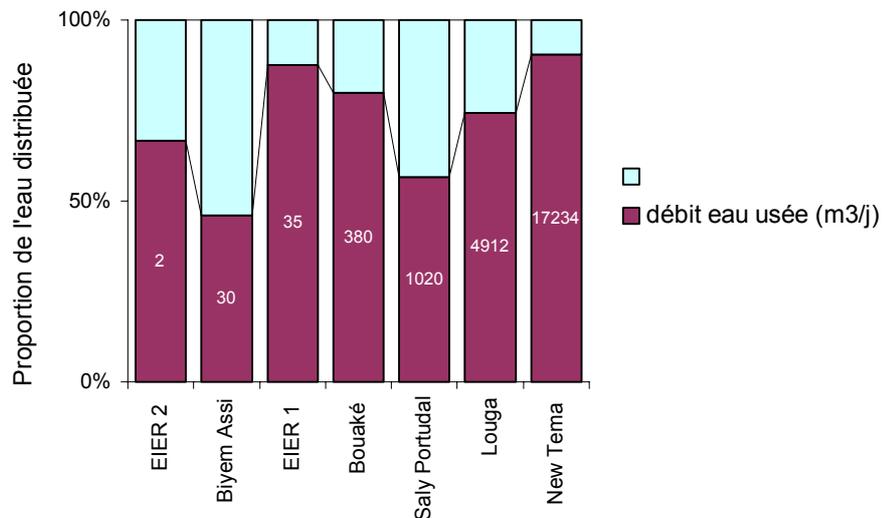


Figure 1 : Taux de collecte dans le bassin versant

La Figure 1 montre la relation entre le volume d'eau potable distribué dans le bassin versant et les débits traités. Le taux de traitement n'est pas une fonction de la capacité de traitement

Le Tableau 5 ci-dessous donne les résultats de collectes des données de dimensionnement et de rendement physico-chimique en Afrique de l'ouest et à Cuba. Les données manquantes sont soit véritablement inexistantes (non mesurées), soit non communicables par les organismes contactés. On remarque la quasi-absence de données pour le Sénégal et l'insuffisance globale du suivi des paramètres qui permettraient d'évaluer le fonctionnement des systèmes par les gestionnaires et exploitants africains. Dans la mesure du possible, les charges ont été calculées à l'aide des débits réels. En absence des données réelles les valeurs de projet ont été utilisées. Pour les stations où les données n'ont pu être collectées, le temps de séjour a été estimé en supposant une profondeur moyenne d'environ un mètre et demi (chiffres en gras et en italique) ; selon la littérature, la profondeur de la plupart de bassins se situe entre 1 mètre et 2 mètres. Des disparités parfois importantes apparaissent entre les données nominales (débit ou charge) et les données réelles, de même qu'entre les capacités en équivalent-habitant et les charges en DBO. Globalement, ces nombreuses lacunes traduisent une connaissance trop insuffisante de ces systèmes d'épuration pour parvenir à les gérer au mieux, tirer les enseignements nécessaires et progresser dans la conception et la gestion d'autres dispositifs.

Le Figure 2 illustre les rapports DBO/DCO en entrée de station, indicateurs de la biodégradabilité des matières organique. Selon la courbe de régression environ 25% de la DCO se trouve sous forme dégradable. Cette proportion n'est pas significativement différente entre Cuba et Afrique de l'Ouest. Dans les pays industrialisés, une rapport de 3 environ est fréquemment cité pour les eaux usées municipales. En région parisienne par temps sec il varie entre 33 et 40% et par temps de pluie il baisse à 25% (Seidl, 1998). On avance l'hypothèse qu'en raison des températures plus élevées en région

africaine les matières organiques arrivent à la station de traitement dans un état de dégradation plus avancée qu'en région tempérée. Cet effet est cependant plus que compensé par la charge plus élevée des eaux usées sur le continent africain. Les concentrations de DBO à Cuba sont plus proche de celle en Europe et plus basses que celle mesurées en Afrique. L'explication se trouve dans la consommation d'eau potable par habitant, nettement plus faible en Afrique, ce qui concentre la pollution. Il en résulte un sous-dimensionnement des stations africaines par rapport aux stations cubaines (Figure 2), qui pourrait être sensible en termes de rendement.

Tableau 5 : Données techniques (dimensions et rendements) collectées par les équipes de l'EIER, de CENHICA et du CEREVE. Les valeurs en gras et en italique sont des estimations.

Pays	Nom Step	Superf (ha)	Capacité nominale (Eq-Hab)	Débit	Débit	Temps séjour	Charge DBO	DBO-in	abat. DBO
				estimé	nominal				
<b>Stations municipales ou industrielles</b>									
Burkina Faso	Ouagadougou : EIER1	0.16	200	45	35	37	500	698	43%
Cameroun	Yaoundé : Biyem Assi	0.072	600	65	30	36	683	756	80%
Côte d'Ivoire	Bouaké : Campus I & II	0.36	1000	476	380	14	278	210	
Côte d'Ivoire	Dabou A :	3.14	88000		4664	10	840	566	
Côte d'Ivoire	Dabou B :	3.30	123000		8610	6	1120	429	
Côte d'Ivoire	Daloa : Centre Hospitalier	0.171	500						
Côte d'Ivoire	Gbapet : Huilerie de palme	0.819	80000	160	180	68	3907	14742	
Ghana	Akossombo	15.3	30000	0.28	6800	34	16	37	
Ghana	Accra : New West Tema	16.70		19067	17234	15			
Ghana	Accra : West Tema	8.19		833	36000	3			
Sénégal	Louga	1.2	12 000	4912	283	64			
Sénégal	Niayes								
Sénégal	Rufisque : Castor							980	87%
Sénégal	Rufisque : Diokoul							680	75%
Sénégal	Saint Louis		30 000						
Sénégal	Saly Portudal	0.4914	5000	240	1020	11			
Cuba	Habana : Les Breezees	0.1		108		22	507	473	74%
Cuba	Holguín : Guardalavaca	2.16	3066	1529		31	110	155	84%
Cuba	Holguín : Estero Ciego (vieja)	0.21	361	386		10	289	157	66%
Cuba	Holguín : Estero Ciego (nueva)	0.34	420	225		15	155	235	64%
Cuba	Varadero : Los Taínos II	6.7		5184		25	159	206	84%
<b>Stations de recherche</b>									
Burkina Faso	Ouagadougou - EIER2	0.0098	15	2.6	2	23	108	407	90%
Niger	Niamey - UAM / Aquadev	0.0085	25	3.3	3	14	120	312	74%
Sénégal	Cambérène - MHEA	0.0018	10	0.5	0.5	36		840	97%

Les quelques données bactériologiques disponibles montrent les normes de qualité permettant la réutilisation des eaux en maraîchage sont rarement atteintes à la sortie des stations de lagunage. Il s'avère que les stations de recherche seulement approchent la norme actuelle de l'OMS à 1000 UFC pour 100 ml dans les effluents (norme que l'OMS devrait réviser à la baisse). Les autres, aussi bien en Afrique qu'à Cuba les dépassent d'un à deux ordres de grandeur. A Cuba, les ressources hydriques disponibles font que la réutilisation des eaux n'est pas (encore) un objectif important, et les lagunes ne sont pas conçues ni gérées pour favoriser l'élimination des germes pathogènes. Les données disponibles ne nous permettent pas d'estimer si le faible abattement est dû à la charge trop importante ou une mauvaise gestion (prétraitement, fuites, bypass etc...).

A partir des données cubaines et malheureusement trop peu de données de l'enquête africaine on peut tenter de donner une image globale du rendement du traitement par lagunage. La tendance générale est conforme à ce qu'on pouvait attendre, avec de meilleurs rendements épuratoires pour les plus longs temps de séjour (Figure 3). Pour obtenir un abattement de 85% en DBO il nous faudra en moyenne 30 jours de séjour, aussi bien en Afrique qu'à Cuba. La relation entre abattement et temps de séjour est en principe plus significative pour l'abattement des germes indicateurs (coliformes et streptocoques fécaux) que pour l'élimination de la pollution organique (Rojas 1999), mais le faible nombre de données collectées ne permet pas de constater dans quelle mesure ce point est effectivement vérifié pour les stations africaines.

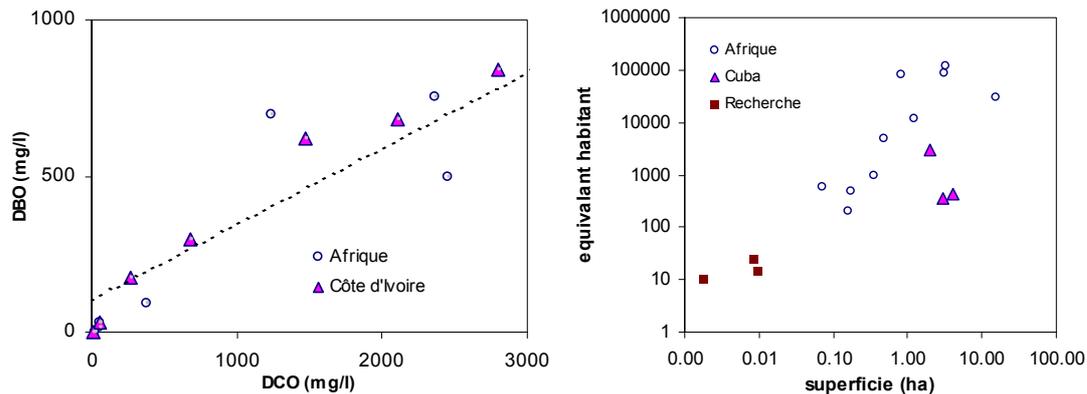


Figure 2 : Dégradabilité de la matière organique arrivant sur les stations(A), et superficie de traitement, par équivalent-habitant (B)

Tableau 6 : Données bactériologiques disponibles pour les stations enquêtées.

Pays	Station	Log(NPP pour 100 ml)		
		Entrée	Sortie	Abatt.
Sénégal	Cambérène-MHEA	9	2	7
Cuba	usine de conserves Caribe	7.7	2	5.7
Cuba	Escuela Paris		2.1	
Burkina	Ouagadougou - EIER2	7	3	4
Cameroun	Yaoundé, Biyem Assi	7	3	4
Cuba	Escuela Cine		3.6	
Sénégal	Rufisque : Diokoul	7	4	3
Niger	Niamey - UAM / Aquadev - Lemna	7.8	4.0	3.8
Cuba	Usine de conserves La Espanola	8.5	4.6	3.9
Burkina	Ouagadougou : EIER1	7	5	2
Sénégal	Rufisque : Castor	7	5	2
Cuba	Usine de conserves 19 de abril		5.5	
Cuba	Porcherie Camacho	6.4	5.6	0.8
Cuba	Usine de conserves La Habanera		6.5	
Cuba	Abattoir San Antonio		6.7	

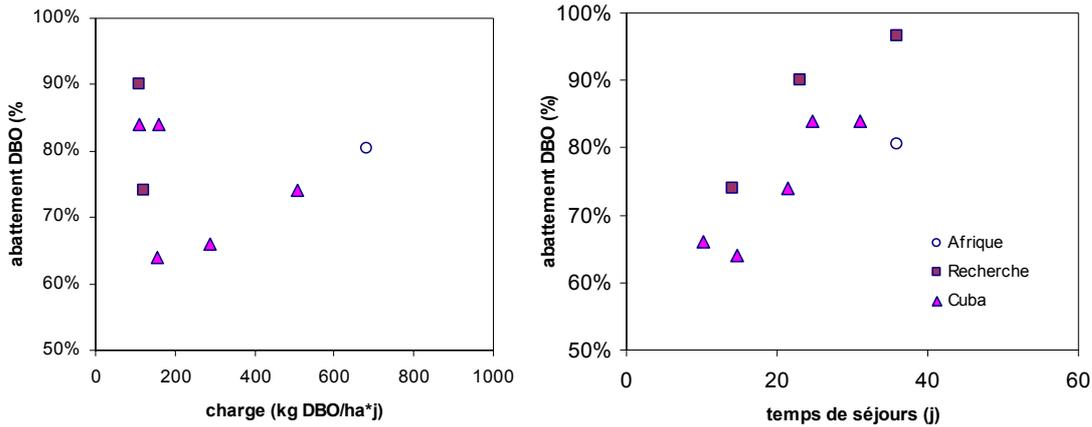


Figure 3 : Quelques données de rendement et de dimensionnement.

#### 4.2.2. Coûts et exploitation

La Figure 4 ci-dessous montre que globalement c'est grâce à l'aide internationale que les stations sont mises en place. Les partenaires du Nord se chargent de l'étude et du financement et les partenaires locaux se chargent de la construction et de l'exploitation. La majorité du financement provient des institutions internationales dont la Banque Mondiale qui compte pour 7 réalisations, puis de l'Europe, aux niveaux communautaires ou nationaux. Seules deux stations ont reçu des financements locaux à travers la MAETUR à Yaoundé et la Volta River Authority à Akossombo au Ghana. On notera que des coûts d'investissement ont été fournis seulement pour 6 des 16 stations étudiées.

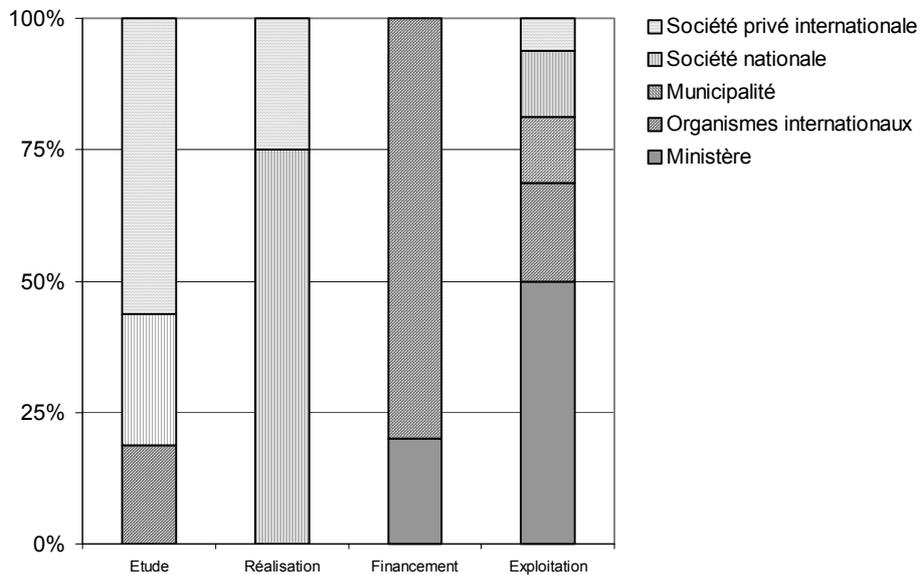


Figure 4 : Le rôle financier des institutions

Le système de gestion des stations en place n'est pas de nature à permettre d'évaluer les charges avec exactitude. Il n'y a pas de compatibilité claire des différents postes de dépenses. Les rares chiffres fournis pour cinq stations ne distinguent pas l'amortissement des investissements, des équipements de bureaux, de laboratoire ou de terrain et les charges de personnel, etc. Par ailleurs, le système socio-économique cubain ne permet pas la collecte de ce type de données car ce n'est que depuis quelques années que les ministères sont tenus à une comptabilité stricte avec un bilan des coûts et des bénéfices. Les frais de fonctionnement (énergie, matériaux ou travail), sont (ont été) basés sur des coûts politiquement acceptables et ne reflètent pas les coûts réels.

Tableau 7 : Coûts de traitement de quelques stations (tous montants en francs CFA)

Données	Cambérène MHEA	UAM	EIER-2	Saly Portudal	Gbapet	West Tema
Année de réalisation	1992	1998	1996	1977	2002	1995
Superficie (ha)	0.0018	0.0085	0.0098	0.4914	0.819	8.19
Débit prévisionnel (m <sup>3</sup> /j)	0.5	4.5	6	1020	180	36000
Lame d'eau (cm/j)	2.7	5.3	6.1	21	2.2	44
Montant de réalisation (en fCFA)	4 000 000	85 000 000*	7 500 000	270 000 000	120 000 000	700 000 000
Charges annuelles	32 000 000	24 200 000	1 000 000	9 000 000	12 000 000	43 200 000
Investissement par m <sup>2</sup> de traitement	222 222 F	1 000 000 F	76 530 F	54 530 F	14 652 F	8 547 F
Charges par m <sup>3</sup> traité	175 342 F	14 737 F	457 F	24 F	183 F	3.3 F

\*Ce montant notablement plus élevé que celui des autres stations pilotes inclut en particulier la mise en place d'un système sophistiqué d'étanchéification des bassins.

Selon les enquêtes, les charges comprennent "l'entretien et l'amortissement des équipements, les frais d'achat des réactifs, les déplacements des équipes d'exploitation, et le paiement des factures d'électricité". Les salaires sont inclus dans les stations de recherche uniquement, et particulièrement élevés étant donné le suivi soigneux dont bénéficient ces stations. Pour la station de recherche à Niamey les frais fixes, l'amortissement et les salaires représentent respectivement 8%, 23% et 68% des charges annuelles. D'après le mode d'estimation habituel, l'amortissement des ouvrages se fait environ sur 20 ans, donc en principe les ouvrages de Saly Portudal sont amortis, mais pour West Tema ce montant devra être égal au moins à 35 MF CFA, somme que nous avons ajoutée aux montants donnés par les exploitants dans la valeur portée au Tableau 7.

L'effet d'échelle est tout à fait évident quand on regarde le prix de construction au m<sup>2</sup> de lagune. Il est beaucoup moins évident quand on considère le prix de traitement d'un m<sup>3</sup> d'eau, rapporté aux charges annuelles. On notera cependant que les stations de Saly Portudal et West Tema sont dimensionnées avec des lames d'eau appliquées très élevées, malheureusement aucune donnée n'est disponible pour juger de leur efficacité en termes de dépollution.

Plus de la moitié des stations sont gérées par des organismes de tutelle comme les Offices d'assainissement (Sénégal), les centres Régionaux (Cote d'Ivoire) ou autres collectivités locales. Pour les stations de recherche (20%) la gestion est effectuée directement par les organismes de recherche.

La figure ci-dessus (!) montre que la plupart des gestionnaires ayant répondu entretiennent bien leurs bassins et leur site, cependant ils délaissent l'équipement électromécanique de la station. De l'avis du personnel exploitant, le matériel d'entretien des pompes et de nettoyage général du système est insuffisant ou inadapté (vétuste, rudimentaire). Ceci n'explique pas le manque d'actions de maintenance, car le matériel nécessaire pour ces opérations est rustique et facilement disponible.

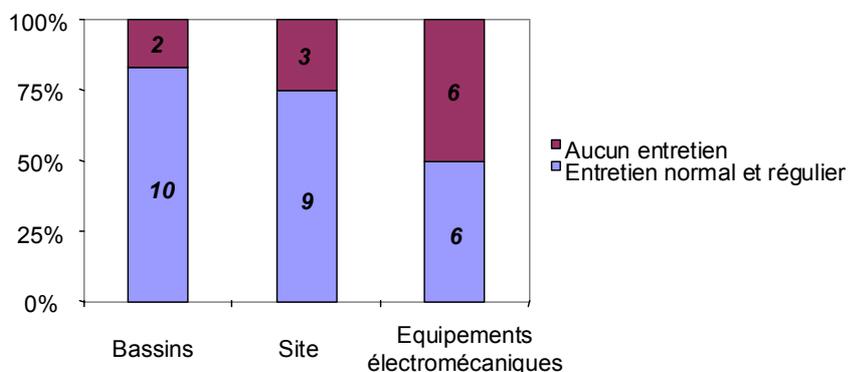


Figure 5 : Niveau d'entretien et de maintenance des ouvrages de la station, les chiffres indiquent le nombre de stations ayant répondu, les stations à vocation de recherche n'ont pas été incluses dans cet échantillon.

L'exploitation des stations d'épuration visitées se résume en trois principales activités :

- l'entretien et la maintenance réguliers des ouvrages de la station,
- la gestion journalière des eaux usées brutes et des effluents traités,
- la gestion de la biomasse et des boues extraites.

Selon les déclarations du personnel exploitant, les visites sur les sites pour l'entretien des installations se font tous les jours dans 13 stations en dehors de celles de Daloa (3 fois par semaine), de Bouaké (aléatoire) et de Yaoundé (1 fois par semaine).

- Les opérations d'entretien normal des ouvrages de prétraitement regroupent essentiellement l'enlèvement des algues, l'entretien des dessableurs, des dégrilleurs et des déshuileurs, et le décolmatage des grilles.
- Les tâches d'entretien des bassins, des digues et des espaces vides du site sont entre autres, l'enlèvement des éléments grossiers ou flottants dans les bassins, la récolte des macrophytes (le cas échéant), le curage des bassins, le nettoyage des parois, le désherbage.
- L'entretien et la maintenance des éléments électromécaniques concernent le nettoyage général des pompes et des clapets ainsi que les systèmes électriques.

Au cours des visites de terrain, nous avons pu constater qu'en dehors de la station expérimentale de Cambéréne, aucune des 15 autres stations ne disposait d'un tableau de bord, pour les opérations courantes d'entretien préventif et encore moins d'un plan de renouvellement du matériel ou de révision des équipements.

Si pour 11 des 16 stations, on a pu relever que les ouvrages paraissaient moyennement bien entretenus, les ouvrages de prétraitement et les bassins de Saly Portudal, de Saint Louis et de Bouaké ne bénéficient d'aucune opération d'entretien. Les bassins sont ainsi envahis par des herbes sauvages et présentent un aspect désolant avec des boues flottantes et des dépôts sauvages d'ordures ménagères.

Sur les 13 stations africaines à vocation de traitement la moitié étaient bien entretenues, un quart moyennement (Louga, Yaoundé, Ouagadougou) et un quart mal entretenu (Saint Louis, Bouaké Daoba).

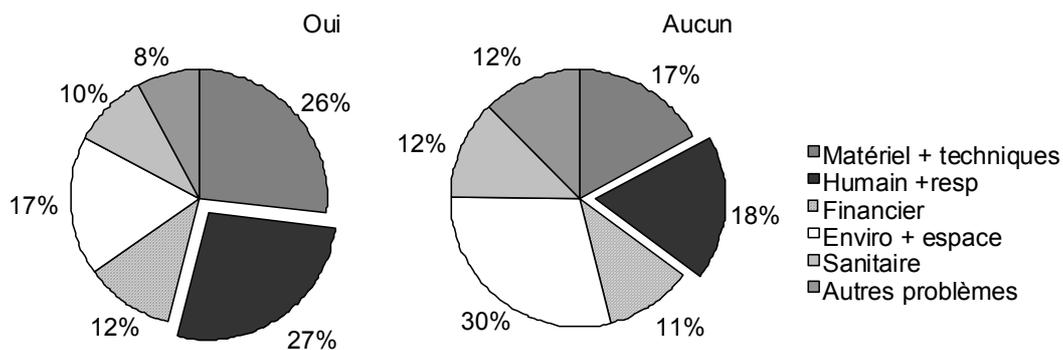


Figure 6 : Principaux problèmes rencontrés par les gestionnaires des lagunes. A gauche problème mentionné, à droite problème non mentionné.

La Figure 6 illustre les deux grandes catégories de problèmes mentionnés par les exploitants : les problèmes de personnel et les problèmes matériels. Les problèmes matériels et techniques sont d'abord perçus comme des problèmes de financement, tandis que les problèmes de personnel peuvent être liés simplement à la mauvaise gestion de la charge de travail. Ainsi les pannes des pompes comme à Dabou, à Gbapet, à Tema et à Akossombo sont souvent liées au manque de financement pour acquérir les pièces. Les préoccupations environnementales ne pèsent pas encore très lourd pour les gestionnaires africains.

### 4.3. Exemple de la station pilote de l'UAM de Niamey

#### 4.3.1. Description du système

Sa mise en place a été inspirée par les expériences antérieures de CENHICA à Guyaba (Santiago, 1997) le travail de la Banque Mondiale (Skillicorn et al., 1993) dans le domaine de l'aquaculture et le manuel du lagunage avec macrophytes d'Yves Charbonnel (1989) en suivant les lignes guides soutenues par Oron (1994) et l'UNEP (1997). Jusqu'à présent l'action épuratoire des lentilles d'eau n'a jamais été étudiée à notre connaissance sous conditions africaines.

L'Université Abdou Moumouni à Niamey (UAM) possède depuis 1998 une nouvelle station pilote pour le traitement des eaux usées domestiques par lagunage. Celle-ci possède 3 filières dont chacune est composée de 6 bassins trapézoïdaux de 14 m<sup>2</sup>, d'un mètre de profondeur et d'un volume d'environ 7 m<sup>3</sup>.

Le traitement par la lentille d'eau a été étudié durant quatre mois, du mois de février au mois de mai, dans un ensemble de 6 bassins en série. Les 3 premiers utilisaient les microphytes (B13 à B15, Figure 7) et les 3 derniers étaient couverts de macrophytes (B16 à B18, Figure 7). La filière recevait environ 3 m<sup>3</sup>/jour d'eaux usées du campus universitaire en 5 bâchées journalières (7h, 10h, 13h, 16h et 19h).

#### Légende :

- B0 : Cuve d'homogénéisation
- B13 à B18 : Filière Lemna
- B13 à B15 : Bassin microphytes
- B16 à B18 : Bassin macrophytes
- S : Bassin avec Tilapia

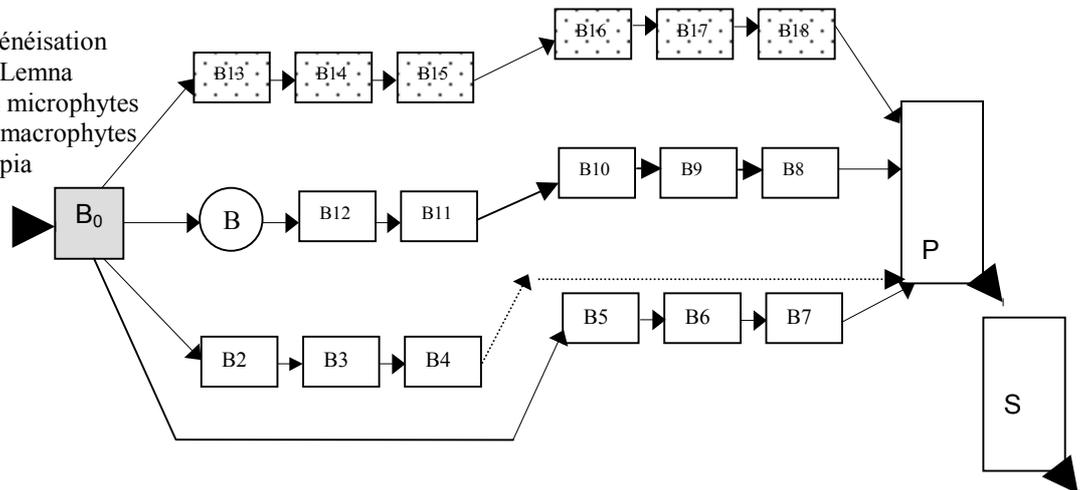


Figure 7 : Schéma de la station pilote de l'Université de Niamey avec en pointillé la filière Lemna.

Pour estimer le rendement du traitement, des échantillons d'eau ont été prélevés à l'entrée du bassin B13 et la sortie des bassins B15 et B18, environ 10 minutes après le début de chaque séquence d'écoulement avec une fréquence hebdomadaire (les vendredi) durant 4 mois. La durée de 4 mois, imposée par les ressources financières restreintes, n'est suffisante que pour une première évaluation. La poursuite des essais sur une durée d'environ 12 mois est à l'étude dans le cadre d'un autre projet. Les paramètres classiques de qualité ont été estimés selon les protocoles AFNOR ou ISO (voir rapport préparé par UAM).

Tableau 8 : Résumé des paramètres opérationnels du système de traitement expérimental étudié à Niamey

Paramètre	Spécification
Débit entrant	3.27 m <sup>3</sup> /j ou 37.4 mm/j sur les 6 bassins de la filière
Evaporation	-7.5 mm/j (-0.64 m <sup>3</sup> /j sur l'ensemble de la filière)
Temps de séjour	14 j (13 à 16)
Capacité	25 équivalents habitant à 40 g de DBO <sub>5</sub> par jour
Charge globale	120 kg-DBO/ha/j ou 1.02 kg DBO/j )
Traitement	3.5 m <sup>2</sup> / équivalent habitant
Microphytes :	1 bassin anaérobie + 1 bassin facultatif + 1 bassin de maturation
Charge du bassin anaérobie	150 g-DBO /m <sup>3</sup> /j ou 730 kg-DBO /ha/j
Macrophytes :	3 bassins de Lentilles d'eau
Densité de lentilles	230 g/m <sup>2</sup> (moyenne identique pour les 3 bassins)
Production	500 à 1500 kg/ha/j
Bassin	tous les bassins sont identiques, entrée à la surface, sortie à -0.5 m
Volume	7 m <sup>3</sup> (L*1*h = 5.6*2.6*1.0 m)
Superficie	14.2 m <sup>2</sup> par bassin

Les lentilles d'eau utilisées pour l'ensemencement ont été collectées pour l'ensemencement dans un bassin proche, recevant également des eaux usées, où elles poussaient naturellement. La production primaire a été estimée tout au long de l'exploitation, d'une part pour pouvoir optimiser la production et d'autre part pour pouvoir établir un bilan financier.

La récolte de la biomasse s'effectuait manuellement 3 fois par semaine (mardi, jeudi, samedi), en récoltant entre un tiers et la moitié de la surface du bassin. Cette procédure a pour objectif de maintenir une quantité sensiblement constante et homogène de lentilles dans le système. Après ré-étalage de la fraction restante la nouvelle densité était estimée. L'ensemble de la biomasse récoltée était pesée pour obtenir le poids humide, une partie était utilisée pour l'estimation des matières sèches produites et la partie restante pour l'alimentation des poissons Tilapia. La détermination des teneurs en N après séchage (un bon indicateur de la richesse en protéines) des lentilles se faisait en utilisant la méthode ISO pour l'azote Kjeldahl.

On a opté pour un système assez fortement chargé pour étudier les possibilités de traitement dans un système le plus compact possible. Le temps de séjour n'y est en effet que de 16 jours pour toute la filière, en tenant compte de l'évaporation.

#### 4.3.2. Résultats obtenus sur la station pilote de l'UAM

On s'aperçoit (Figure 8) que le système a d'une part besoin au moins d'un mois pour se stabiliser et d'autre part que les besoins de gestion changent avec les saisons. On peut signaler un bloom algal printanier qui s'est traduit par une augmentation du flux des MES, de la DBO brute, de la DCO brute et du NTK brut de la partie microphytes vers la partie macrophytes (Figure 8) au mois de mars.

Tableau 9 : Rendement épuratoire moyen de la filière Lemna pendant 4 mois de fonctionnement.

Paramètre	MES	DBO-f	DBO	DCO-f	DCO	NTK	N-NH4	P-PO4	Germes	
									Strepto. Fécaux	Coli. Fécaux
Valeurs moyennes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	NPP /100ml	NPP /100ml
Entrée (B0)	238	171	312	258	617	69.9	45.7	3.91	2.5 10 <sup>6</sup>	5.7 10 <sup>7</sup>
Sortie micro (B15)	103	73.5	144	100	280	41.8	25.9	2.41	1.8 10 <sup>4</sup>	8.3 10 <sup>4</sup>
Sortie filière (B18)	99.6	43.6	98.9	97.7	233	24.5	12.8	0.7	1.1 10 <sup>3</sup>	9.8 10 <sup>3</sup>
Rendement										
R - micro	57%	57%	54%	61%	55%	40%	43%	38%	99%	100%
R - macro	3%	41%	31%	2%	17%	41%	51%	71%	94%	88%
R - total	58%	75%	68%	62%	62%	65%	72%	82%	3.4*	3.8*

\* abattement en unité log

Pendant la période d'expérimentation, de février à mai, la température maximale journalière de l'eau a naturellement augmenté progressivement de 25°C à 35°C (Figure 8). Cette augmentation est concomitante à une amplification de la production d'ammonium (Figure 8) notamment à partir des dépôts qui se constituent au fond des bassins. Ces deux facteurs (température et ammonium) ont probablement freiné la croissance des macrophytes (figure 9a). Par ailleurs, à partir du 7 mai, des remontées de boues ont été observées dans les bassins ce qui a provoqué une disparition rapide des lentilles. L'ensemble de phénomènes qui a occasionné cette remontée n'est pas bien compris aujourd'hui. D'un point de vue très macroscopique, on constate que le système n'a pas pu se stabiliser au cours de la période, et a fini par diverger. L'augmentation progressive de la température ainsi que l'accumulation de boues sont des facteurs explicatifs pour une épuration de plus en plus médiocre de l'ammonium, sans doute due à un relargage à partir des boues favorisé par l'augmentation de température. La remontée des boues serait alors un point de rupture.

L'optimum de croissance de la plupart des espèces Lemnaceae se situe autour de 30 à 32°C. Des températures plus élevées induisent ensuite un déclin rapide (Iqbal, 2001), cependant nous n'avons pas ce type de données spécifiquement pour les espèces se développant naturellement au Niger. Des expériences similaires menées au CINARA en Colombie (comm. personnelle) ont montré par ailleurs une faible résistance des lemnacées à des teneurs en ammonium de plus de 30 mg/l. La combinaison de ces deux facteurs, y compris l'apparition de boues en surface, a fait chuter la culture de la Lentille à la fin de l'expérience (Figure 8).

Malgré l'évolution de la température, l'abattement des pathogènes est resté très bon. La Figure 8 montre l'effet purificateur du soleil dans les bassins à microphytes, qui se traduit par un abattement de l'ordre de 3 unités logarithmiques. On peut constater aussi l'influence négative de la couverture de lentilles d'eau avec un abattement qui reste significatif mais qui n'est plus que de une unité log sur les trois bassins à macrophytes.

Les différents bassins sont dimensionnés conformément aux recommandations usuelles (voir par exemple Mara et Pearson, 1998), soit une charge en DBO dans le bassin anaérobie d'environ 150 g.m<sup>-3</sup>.jour<sup>-1</sup>, et une charge surfacique d'environ 350 kg-DBO.ha<sup>-1</sup>.jour<sup>-1</sup> pour une température de fonctionnement supérieure à 25°C. Les mêmes méthodes de dimensionnement prévoient un abattement de 3.6 unités log pour les trois premiers bassins exempts de macrophytes. Les rendements obtenus pour la DBO sont satisfaisants pour un système de ce type, ce qui conforte a priori les règles de dimensionnement conseillées. Le rendement obtenu pour les coliformes fécaux est inférieur, les 3.6 unités log (prévues à 25°C) n'étant atteintes qu'en sortie du dernier bassin à macrophytes et non pas en sortie du troisième bassin à microphytes. On peut envisager que la vitesse de disparition des coliformes fécaux soit plus faible que prévue dans des conditions de température élevée, les coliformes étant même susceptibles de continuer à croître dans de telles conditions. Cependant l'instabilité du système et le problème de boues rencontré pose éventuellement un problème de rendement qui devrait être vérifié sur le long terme, et a posé plus concrètement un problème majeur au développement des lentilles d'eau. Ce point doit également être vérifié, un dysfonctionnement dans l'alimentation (changement non contrôlé de qualité d'eau d'entrée par exemple) ne pouvant être exclu. L'occurrence de "crises" dans la production de lentilles, les facteurs explicatifs et les méthodes de remédiation ne peut être étudiée qu'au travers d'un suivi de longue durée.

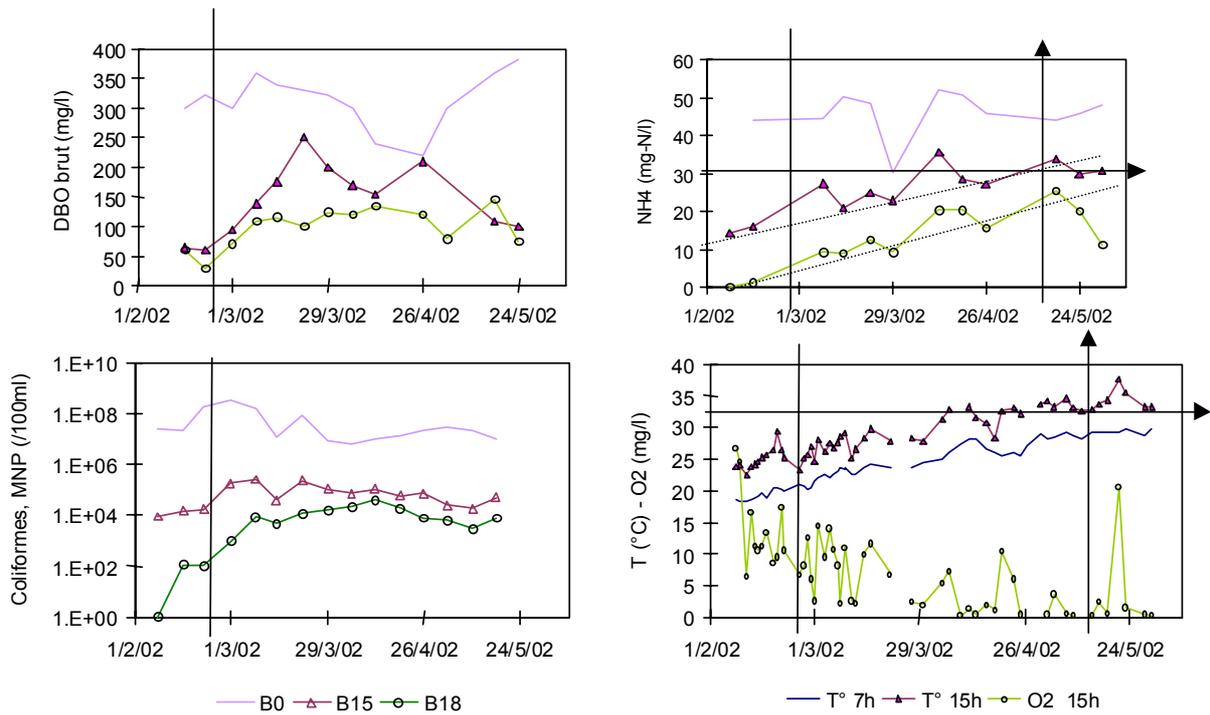


Figure 8 : Evolution de quelques paramètres de qualité dans la filière à micro- et macrophytes. B0 représente les eaux usées brutes, B15 est la sortie des bassins à microphytes tandis que B18 correspond à la sortie des bassins à macrophytes à la fin de la filière. La ligne verticale indique la phase d'équilibrage hydraulique du système égale au moins à  $t_o + t_{\text{sejour}}$  et correspond au 24 février. Le graphique de la température du B18, montre la date de la limitation théorique de la croissance par la température (flèches).

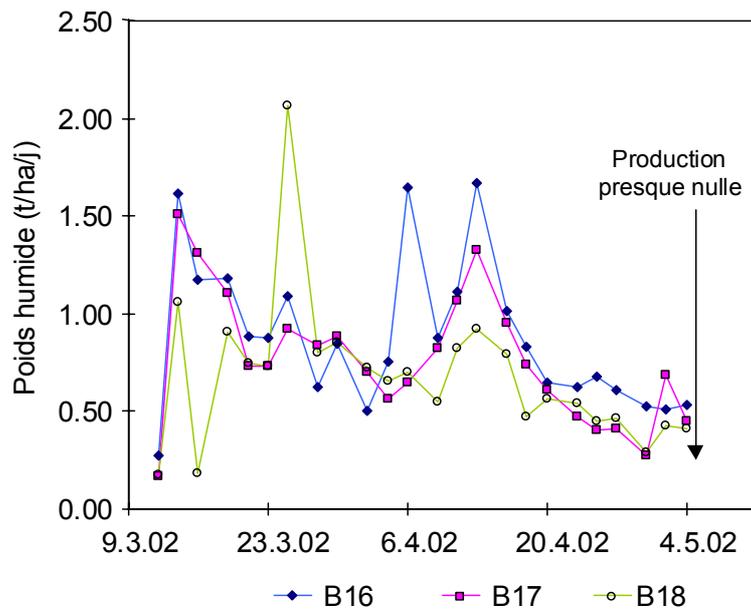


Figure 9 : Evolution de la production de lentille d'eau dans les trois bassins

#### 4.4. Conclusions

Les premières conclusions qu'on peut tirer de la partie technique des enquêtes sont qu'une bonne maintenance des stations est effectuée en général à l'exception du matériel électromécanique. Cependant un nombre limité de stations souffre d'un fort déficit d'entretien de base. Par contre le suivi du fonctionnement des systèmes est largement insuffisant (sauf en ce qui concerne les stations à vocation de recherche), cette forte lacune est terriblement dommageable pour tirer des retours d'expérience à partir des stations en grandeur réelle et continuer le développement de ce type de systèmes au delà des stations pilote. En termes de gestion des systèmes également, le manque de connaissances sur le fonctionnement des systèmes (formation des exploitants et expérience de gestion, retour d'expérience et bilans) est une sérieuse lacune, nuisible à l'efficacité des systèmes.

En termes de performance, les niveaux d'abattement de la pollution organique se situe entre 60 et 90% et sont donc plutôt satisfaisants pour ce type de système, mais par contre, aucune des stations à vocation de traitement n'atteint la limite actuellement recommandée par l'OMS de 1000 coliformes fécaux pour 100 ml à la sortie de la station pour une réutilisation en agriculture.

Les premiers résultats des expériences pilotes avec les lentilles d'eau, démontrent la faisabilité du traitement des eaux usées dans un système d'agriculture urbaine en condition sub-sahéliennes. Le système de lagunage utilisé atteint les performances comparables autres systèmes de la région avec un bon abattement microbien. L'effluent à la sortie de la filière dépasse la norme de l'OMS pour la réutilisation des effluents en agriculture de moins d'une unité log. La contribution des macrophytes à l'épuration est significative pour la plupart des paramètres (DCO et MES excepté). Pour la DBO et N la contribution est comparable pour les microphytes et pour les macrophytes, tandis que pour le phosphore, les macrophytes sont plus efficaces. Les pathogènes sont principalement épurés par la filière à microphytes, qui devrait être augmentée d'un bassin pour que la norme de 1000 coliformes pour 100 ml puisse être atteinte (ou le débit pourrait être diminué). Pour obtenir des teneurs plus faibles en azote et en carbone à la sortie il devrait être envisagé de choisir une charge plus faible et un temps de séjour un peu plus élevé. Les teneurs trop élevées en azote ammoniacal limitent la croissance des macrophytes et diminue la réutilisation des effluents notamment dans la pisciculture. Pour une bonne gestion des systèmes de traitement par macrophytes la surveillance de la température et de l'ammonium est indispensable pour ne pas dépasser les limites de tolérance de l'espèce utilisée, en passant par exemple en sortie du dernier bassin à microphytes.

## 5. Réutilisation

### 5.1. Méthodologie des enquêtes de terrain

Cette étape de la recherche avait pour objectif principal d'évaluer les possibilités de valorisation des sous-produits du lagunage pour le financement de l'exploitation des systèmes d'épuration par lagunage.

Les enquêtes en Afrique ont été menées suivant une combinaison d'approches qualitatives et quantitatives, aux travers d'outils tels que les techniques de recueil des données par observation directe, les guides d'entretiens, des questionnaires et la tenue de "focus groups".

Les "focus groups" ont été constitué de 5 à 10 utilisateurs réels ou potentiels des sous-produits du lagunage travaillant dans les environs de la station de traitement. Les organismes locaux et les exploitants des stations ont facilité la mise en place des groupes et ont aidé leur la tenue par le biais de traduction en langue locale des questions et réponses. La durée des "focus groups" a été de 1 à 2 heures.

A l'aide des discussions organisées en "focus groups" et des fiches d'enquête les chercheurs de l'EIER ont évalué le potentiel des sous-produits de l'épuration dans les environs de chaque station étudiée. Les questions portaient notamment sur :

- les activités agropastorales dans un rayon de 1 km autour de la station,
- la demande en sous-produits du lagunage,
- les risques sanitaires et environnementaux liés à la pratique de réutilisation des sous-produits,
- les coûts d'acquisition des sous-produits,
- les avantages et inconvénients tels que perçus par les exploitants.

Tableau 10 : Stations choisies pour la tenue des "focus groups"

Pays	Nom de la station	Ville	type rejet	Traitement
Burkina Faso	EIER 1 – microphytes	Ouagadougou	campus école	+
Cameroun	Biyem Assi	Yaoundé		+
Côte d'Ivoire	Campus I & II	Bouaké	campus	+
Côte d'Ivoire	Dabou A	Dabou		+
Ghana	West Tema	Accra	municipal	+
Sénégal	Castor	Rufisque		+
Sénégal	Saint Louis	Saint Louis		+
Niger	UAM	Niamey	campus université	Recherche
Sénégal	Cambéréne – MHEA	Dakar		Recherche

### 5.2. Résultats des enquêtes de terrain

Les paramètres concernant la valorisation collectés ou estimés sur place comprennent l'usage actuel et potentiel de sous-produits (l'eau traitée, la biomasse produite et les boues). On a cherché la quantification autant que faire se peut : volumes utilisés, qualité des produits, perception des risques pour la santé publique, principe de fonctionnement, les prix.... le formulaire détaillé de l'enquête se trouve en annexe du rapport préparé par l'EIER.

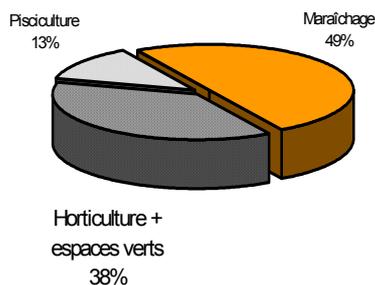


Figure 10 : Principaux domaines de réutilisation des effluents des stations de lagunage (12 stations sur 16)

Les effluents traités, la biomasse végétale collectée (macrophytes) et les boues extraites des bassins de stabilisation sont les principaux sous-produits issus du lagunage. Les observations faites autour des sites ont permis de relever que la réutilisation des sous-produits de l'épuration était pratiquée dans environ 50% des sites (8 stations sur 16). Il en ressort que le maraîchage urbain est le secteur agricole où les sous-produits de l'épuration, principalement les effluents, traités ou non, sont les plus utilisés (Figure 10). Ce secteur est suivi respectivement par l'horticulture et l'arrosage des espaces verts (38%) et la pisciculture (13%; Niamey et Akossombo). Les effluents issus des stations de lagunages de Yaoundé, de Bouaké, de Dabou, de Daloa, de Gbapet, de Tema ne sont pas directement utilisés. Ils sont rejetés dans des cours d'eau et des lacs dont les eaux sont ensuite utilisées pour le maraîchage.

La biomasse végétale est valorisée principalement dans les stations expérimentales à macrophytes de l'EIER-2 (laitue d'eau ou *Pistia stratiote*), de Niamey (*lemna* ou jacinthe d'eau) et de Yaoundé (*Pistia stratiote*). Cette réutilisation reste donc encore à l'échelle expérimentale. A Ouagadougou (EIER-2) les macrophytes sont soit directement enfouis dans les sols agricoles ou co-compostées avec les ordures ménagères du campus de l'EIER et les boues de la station. A Yaoundé, la fréquence de récolte des macrophytes est de une fois toutes les deux semaines et à chaque fois 70 kg de laitue d'eau sont extraites des bassins de stabilisation. A Niamey, la jacinthe d'eau est récoltée tous les 10 jours tandis que les lentilles sont extraites tous les 2 jours. La réutilisation expérimentale des jacinthes d'eau à l'Université de Niamey est centrée sur la fabrication de plaques de contreplaqué, de spirales antimoustiques et de compost. Par contre la lentille d'eau est utilisée exclusivement pour la nutrition de *tilapia* en pisciculture. Ce type de plante, peu fibreuse, est en effet reconnu pour sa richesse en nutriments (protéines et vitamines) très apprécié par les poissons comme par de nombreux animaux d'élevage.

Les boues d'épuration, du fait de la rareté de leur extraction dans les différents sites étudiés, n'ont fait l'objet de réutilisation que dans les sites de Louga, de Cambérène, de Yaoundé et de l'EIER1, qui sont les stations ayant déjà effectuées au moins une extraction avant la date de la visite. Après avoir séjourné sur les lits de séchage ou dans les espaces vides proches des installations, ces boues sont alors récupérées gratuitement par les promoteurs agricoles pour épandage direct ou après co-compostage avec les ordures ménagères ou les macrophytes extraites des bassins de stabilisation.

### 5.2.1. Potentiel des sous-produits

En dehors des sites expérimentaux, le seul sous-produit de l'épuration par lagunage qui soit réutilisé est l'eau elle-même. Les quantités d'eaux usées ou polluées utilisées en maraîchage sont variables selon les sites. A Ouagadougou par exemple, des études précédentes avaient estimé à 56 m<sup>3</sup>/j la quantité d'eaux usées utilisées sur 70 ha de site maraîcher de la ville (Wéthé et al., 2001, Cissé, 1997). Le ratio qui en découle est de 8 l/m<sup>2</sup>/j de parcelle agricole. Dans la région de Kumasi au Ghana, ce ratio est plus élevé probablement à cause de l'utilisation de motopompes. A Niamey, le volume d'eaux usées effectivement utilisées pour arroser les plantes est estimé environ 2000 m<sup>3</sup>/j, pour une application estimée à 9,8 l/m<sup>2</sup>/j. Ces différents résultats montrent que la part des eaux usées utilisées en agriculture urbaine est relativement faible par rapport aux besoins actuels.

Des résultats des "focus group" tenus à Ouagadougou, Niamey, Dakar et Yaoundé, il ressort que les eaux usées et polluées utilisées en agriculture urbaines sont utilisées à proximité et acheminées dans les parcelles de deux façons : en utilisant des seaux et des arrosoirs de 10 à 15 litres pour la plupart des maraîchers ou en effectuant une irrigation par des canalisations avec ou sans motopompe (cas de plus de 50% des maraîchers de la ville de Kumasi au Ghana) (IWMI, 2002).

Un autre avantage des eaux traitées est qu'elle contiennent des quantités importantes de nutriments (N et P notamment). Nous avons donc évalué les apports en engrais actuels sur les parcelles maraîchères. Abdou (2002) a évalué les ordres de grandeur suivants pour Niamey : 3750 CFA par ha et par campagne maraîchère pour les engrais et 3000 CFA pour les amendements organiques, environ 15 kg d'engrais par ha et par campagne. La valeur estimée à Ouagadougou est de 30 kg par hectare.

Pour un campagne d'un mois environ les quantités d'eau appliquées sont d'environ 3000 m<sup>3</sup>, soit environ 90 kg de matières nutritives par ha et par campagne. Pour un coût de l'ordre de 6750 CFA par hectare. Les apports de nutriments par les eaux traitées sont a priori compatibles avec les besoins du maraîchage, resterait à vérifier que les nutriments qu'elles amènent en quantité suffisante sont bien équilibrés et assimilables par les cultures.

### 5.2.2. Caractérisation des promoteurs agricoles

Le développement de l'activité agricole en milieu urbain en Afrique a de multiples causes, le problème du chômage en milieu urbain africain n'étant pas la moindre. En effet, l'étroitesse du marché de l'emploi devenu de plus en plus sélectif dans les pays africains, la baisse du recrutement dans la fonction publique et les entreprises privées, l'exode accru des jeunes vers les villes, etc., contraignent certains citoyens en âge d'activité à s'orienter vers le maraîchage qui ne demande pas de qualification particulière. D'autres raisons plus spécifiques à certaines villes peuvent justifier ce choix. A Ouagadougou notamment d'autres facteurs ont été mis en évidence comme la faillite dans une activité antérieure (petit commerce), l'héritage de l'activité d'un parent (fatigué ou décédé), le licenciement (Cissé, 97). A Niamey, on évoque la nécessité de subvenir aux besoins familiaux, d'avoir des revenus substantiels ou de profiter de l'opportunité offerte par la présence gratuite des eaux usées. Pour les acteurs de Yaoundé, il s'est agit de la nécessité "d'arrondir les fins de mois" et d'avoir un revenu supplémentaire.

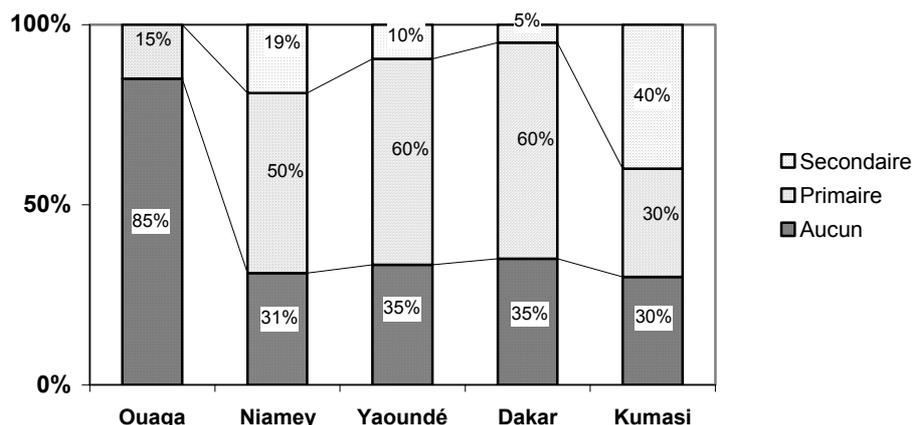


Figure 11 : Le niveau de formation des maraîchers

Tableau 11 : Le genre des maraîchers

Gendre	Ouaga	Niamey	Yaoundé	Dakar	Kumasi
--------	-------	--------	---------	-------	--------

Masculin	30%	97%	57%	100%	90%
Féminin	70%	3%	43%	0%	10%

*L'observation du*

Tableau 11 révèle la prédominance du genre masculin dans l'activité agricole en milieu urbain en Afrique de l'Ouest et du Centre. Cette situation est plus marquée à Niamey (97%), à Dakar (100%) et à Kumasi (90%). L'écart est atténué à Yaoundé (57%) et inversé Ouagadougou (30%). L'analyse de la Figure 11 révèle la sous-scolarisation des promoteurs agricoles avec plus d'ampleur à Ouagadougou, ou près de 85% des promoteurs n'ont jamais connu le chemin de l'école et près du tiers à Niamey, Dakar, Yaoundé et Kumasi.

**5.2.3. Statut foncier**

Les deux tiers des agriculteurs interrogés à Ouagadougou, Niamey et Yaoundé déclarent posséder une seule parcelle agricole avec des superficies moyennes cultivées de 230 à 300 m<sup>2</sup>, environ à Ouagadougou, environ 4000m<sup>2</sup> le long du fleuve Niger à Niamey, 200 à 600 m<sup>2</sup> à Yaoundé et 1000 à 20000 m<sup>2</sup> dans la région périphérique de Kumasi. L'autre tiers possède au moins deux parcelles agricoles sur les sites. Les espaces occupés par l'agriculture urbaine sont en général des bas fonds marécageux, les terrains libres inoccupés, les lits des cours d'eaux, les exutoires des effluents issus des stations d'épuration. Ces parcelles jouissent pour la plupart d'un statut foncier précaire. Plus du tiers des parcelles sont occupées de manière illégale sans autorisation des propriétaires légitimes, en général l'Etat ou la municipalité.

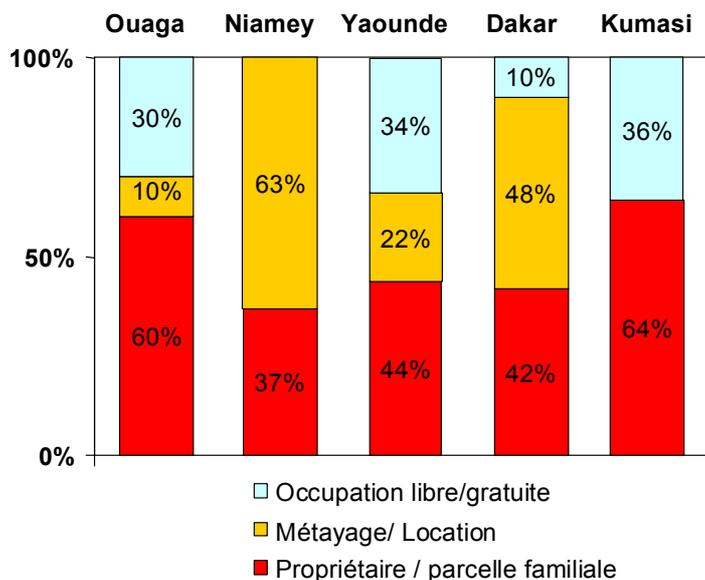


Figure 12 : Statut foncier des parcelles agricoles

En l'absence de toute autorité en charge de la surveillance de ces lieux, les promoteurs agricoles viennent ainsi les coloniser en attendant d'éventuelles expulsions. Les parcelles faisant partie des terrains familiaux ou de l'héritage sont sujettes au métayage de la part des propriétaires et des autochtones ou alors relèvent du droit coutumier coordonné par les chefs traditionnels (cas de Yaoundé et Kumasi). Les conditions de location annuelle des parcelles agricoles sont diverses selon les pays. Il s'agit dans la plupart des cas d'un loyer annuel allant de 15000 à 100000 CFA/an à Yaoundé, 48000 CFA/an à Niamey ou alors du partage du produit de la récolte entre l'agriculteur et son « bailleur » (IAGU, 2001, Wéthé et al., 2001, Kengné et al., 2001, Abdou, 2002, IWMI, 2002).

#### 5.2.4. Perception des promoteurs de sous-produits

L'importance des eaux usées dans l'agriculture urbaine est appréciée différemment par les promoteurs agricoles selon que l'on se trouve dans des zones à déficit hydrologique ou dans les zones nanties. En effet, dans les villes des pays sahéliens, à déficit pluviométrique important comme Ouagadougou, Niamey et Dakar, les agriculteurs urbains pensent que les eaux usées et polluées représentent une ressource en eau précieuse permettant de pratiquer le maraîchage pendant les saisons sèches à la suite des cultures pluviales. L'utilisation des eaux usées urbaines en agriculture est une pratique qui possède des avantages exprimés par les promoteurs agricoles rencontrés :

- la gratuité,
- la quasi - pérennité de la ressource en eaux usées, quelle que soit la saison climatique ; les eaux usées représentent une alternative à la pénurie « *d'eau propre* » déjà très rare surtout en saison sèche.
- le potentiel nutritif des eaux usées qui permettent d'améliorer la fertilité des sols et d'accroître le rendement des cultures.
- l'amélioration de la qualité des plantes facilitant ainsi leur vente. Certains promoteurs pensent que « *l'utilisation des eaux usées donne aux plantes un aspect agréable et attirant pour les consommateurs* » ou encore que « *les eaux usées embellissent les légumes* ». D'autres promoteurs vont même jusqu'à penser que « *les eaux usées permettent également de tuer les insectes parasites qui attaquent les plantes, diminuant ainsi la quantité d'engrais chimiques et organiques qui coûtent chers* » .

L'utilisation des eaux usées en agriculture urbaine représente une importante activité économique et la garantie de revenus substantiels pour les promoteurs : à Niamey par exemple une parcelle maraîchère de 4200 m<sup>2</sup> produit une recette environ 850000 CFA/an/promoteur. Une étude menée dans la périphérie de Kumasi l'estime à environ 455000 à 650000 CFA/an/promoteur, tandis qu'à Dakar elle varie entre de 350000 à 1200000 CFA/an/promoteur selon l'expérience des promoteurs, la spéculation existante, etc. (Abdou, 2002; Cornish et al.2001; IAGU, 2001).

Les inconvénients de l'utilisation des effluents et des eaux usées et polluées en agriculture urbaine relevés par les promoteurs agricoles situés autour des exutoires des stations expérimentales est

- la quantité limitée des effluents qui en découlent
- la concentration élevée des matières en suspension susceptible de colmater le sol.
- les teneurs élevées en coliformes et streptocoque fécaux, augmentant les risques de contamination avec des maladies d'origine hydriques : démangeaisons cutanées, bilharziose, paludisme, « maux de ventre », typhoïde etc....

On notera que les questions sanitaires sont évoquées seulement auprès des stations expérimentales. Nous pensons qu'il faut y voir une marque de la diffusion de connaissances rendue possible vers l'aval par le suivi des stations expérimentales, et le contact des réutilisateurs avec les gestionnaires locaux.

#### 5.2.5. Financement de l'accès aux sous-produits de l'épuration : avis des promoteurs agricoles

L'avis des exploitants agricoles sur leur volonté à financer l'acquisition des eaux usées d'arrosage est mitigé dans l'ensemble des sites agricoles visités.

Les entretiens par focus groups ont réuni au total 93 exploitants maraîchers, dont 76% étaient des hommes et 24% des femmes. Sur ces 8 sites agricoles, seuls 38% du total des exploitants rencontrés pendant les focus groups ont émis un avis favorable au paiement des eaux traitées issues du lagunage. Cette proportion est de 48% chez les hommes contre seulement 5% chez les femmes. Les prix proposés par ces exploitants dépendent des sites, les prix proposés étant plus élevés là où une majorité d'exploitants est prête à payer.

Les montants proposés sont de 50 à 100 F CFA par m<sup>3</sup> d'eau traitée, sauf à Ouagadougou où on descend à 15 à 25 F CFA. Il est demandé en contrepartie que l'accès soit facilité, éventuellement par la mise en œuvre de motopompes par l'état (ou les exploitants de la station).

Les raisons énoncées par les 62% des exploitants réfractaires sont diverses et dépendent également des localités. Là où l'eau est abondante dans les bas-fonds, l'utilisation de l'eau traitée n'est pas jugée intéressante, au contraire, certains se plaignent que les eaux usées souillent les ressources en eau. Par ailleurs, dans certains pays, l'utilisation des eaux traitées pour le maraîchage est contraire à la législation (Ghana). Dans le cas où la situation foncière des promoteurs est incertaine, la volonté de payer l'eau est également moindre. L'idée d'investir pour une nouvelle ressource alors que la situation foncière est incertaine est jugée inacceptable.

100 F CFA par m<sup>3</sup> d'eau est nettement plus élevé que les coûts de fonctionnement des deux grosses stations, à fort débit surfacique (voir Tableau 7) mais dont les rendements épuratoires sont inconnus, 100 F CFA est par contre moins élevé que les coûts des plus petites stations, qui incluent des coûts spécifiques de recherche. Par ailleurs, on peut s'interroger sur le réalisme de la volonté de payer affichée par les maraîchers. En effet, en reprenant les surfaces agricoles, les quantités d'eau utilisées et les revenus, on s'aperçoit rapidement, que le système n'est pas rentable. Selon l'exemple de Niamey, une parcelle de 4200 m<sup>2</sup> rapporte 850000 F CFA, mais nécessite 9.8 l/m<sup>2</sup>/j. Les 4000 m<sup>3</sup> nécessaires annuellement (pour une hypothèse d'arrosage durant 4 mois au cours des campagnes) représentent un montant financier 400000 CFA et feraient diminuer largement de revenu actuel du maraîcher. A ce prix, l'utilisation d'eaux traitées ne peut que demeurer secondaire pour le maraîcher, c'est une ressource qui ne devrait être utilisée qu'avec parcimonie, sans doute en période de sécheresse. La conséquence est que les eaux traitées produites ne seraient que rarement utilisées et que leur vente ne pourrait permettre le fonctionnement de la station à moins que sa zone de chalandise soit très étendue, ce qui nécessite des infrastructures de transport de l'eau également onéreuses.

Une autre hypothèse de calcul de la valeur des eaux traitées peut être basé sur leurs apports en matières nutritives, en comptabilisant les économies d'achats d'engrais. Selon cette hypothèse, en reprenant les estimations réalisées à Ouagadougou et Niamey, le prix de vente de l'eau traitée ne devrait pas dépasser quelques CFA par m<sup>3</sup>.

### 5.2.6. Les contraintes rencontrées

D'un point de vue pratique, le déroulement de cette étude a buté sur un certain nombre de contraintes parmi lesquelles :

- L'incohérence et l'insuffisance des informations obtenues auprès des acteurs en charge de la gestion des stations de lagunage. Les données collectées sont incomplètes et ne concernent pas tous les paramètres voulus sur l'ensemble des stations, ce qui ne permet pas une analyse comparée des stations de lagunage en fonction des paramètres techniques de dimensionnement ou ceux relatifs à la qualité des eaux usées et des effluents. Au delà cette étude, ce point est identifié comme un obstacle majeur au développement futur de ces techniques en Afrique de l'Ouest.
- L'inadéquation entre le temps alloué à la mission de terrain et la disponibilité des exploitants des stations de lagunage : malgré la planification de l'opération et les réservations faites à l'avance par les équipes locales associées à ce travail, il n'a pas toujours été facile de rencontrer pour une durée raisonnable, les exploitants des stations choisies.
- La méfiance des exploitants agricoles : ces derniers ont été parfois réticents à nous recevoir, compte tenu du statut foncier précaire de leurs parcelles. Ils craignaient en effet que notre mission soit commandée par les autorités locales qui selon eux, ne viennent leur rendre visite que pour les menacer d'expulsion.

### 5.3. Méthodologie pilote

Une des formes de valorisation directe des macrophytes récoltés est la pisciculture (Alaerts 1996, Skillicorn 1993). Les poissons forment un produit avec une valeur ajoutée beaucoup plus élevée que

les macrophytes eux mêmes. La station pilote de Niamey possède deux bassins P et S qui ont été peuplés de poissons Tilapia (Figure 7). Le bassin S, avec une superficie d'environ 30 m<sup>2</sup> et une profondeur de 50 cm a été divisé en deux par un grillage plastique etensemencé avec des alevins de Tilapia provenant du fleuve Niger d'une taille moyenne de l'ordre de 10 cm (12g). La densité initiale était approximativement de 5 à 6 individus le m<sup>2</sup> (70 g/m<sup>2</sup>).

Dans la partie S1, les poissons n'étaient pas nourris, tandis que dans la partie S2, les Tilapia étaient nourris avec un mélange des Lemnacées récoltées sur les bassins B16 à B18. Les poissons étaient nourris par 500 g de lentilles tous les jours, soit la moitié de leur poids en début d'expérience, et 15% de leurs poids en fin d'expérience. Cette valeur en fin d'expérience demeure supérieure aux 10% conseillés par Skilicorn et al. (1993), les lentilles étaient consommées en quelques heures. Dans les deux parties du bassin, les poissons peuvent se nourrir également de détritux provenant du sédiment.

### 5.3.1. Résultats pilote

Le graphique ci dessous montre la production cumulée de lentilles d'eau dans les différents bassins. On s'aperçoit que la productivité ne varie pas significativement d'un bassin à l'autre. La densité des lentilles d'eau était maintenue, à peu près identique, sur tous les bassins autour de 230 g/m<sup>2</sup>. La production a diminué petit à petit au cours de l'expérience, passant de 0.12 à 0.07 kg/m<sup>2</sup>/j de poids frais de lentilles. La teneur en azote des lentilles d'eau diminuait du bassin B16 au bassin B18, elle était respectivement 6.5%, 3.7% et 2.2% de poids sec les bassins B16, B17 et B18 respectivement. Cette évaluation doit être corrélée à la diminution des teneurs en azote dans l'eau. Les quantités d'azote exportées par les lentilles sont ainsi de l'ordre du quart des quantités d'ammonium éliminé dans les trois bassins à lentilles d'eau.

La croissance de Tilapia (1.5 g/m<sup>2</sup>/j) est plus rapide dans le bassin alimenté par les lentilles d'eau (Figure 13). Les poissons prennent plus rapidement du poids et se reproduisent mieux que la population témoin. L'aquaculture est le moyen le plus simple pour transformer la lentille d'eau. Les plantes n'ont pas besoin d'être stockées ni d'être transformées. Selon l'OMS les poissons élevés de cette manière ne présentent pas d'inconvénients pour la consommation humaine si, avant la consommation, ils se sont purifiés dans de l'eau propre.

Diverses constatations de terrain, dont le dénombrement des effectifs dans chacune des deux parties du bassin, prouvent que des individus ont réussi à passer d'un coté à l'autre du bassin. Nous considérerons donc ces données globalement dans la suite.

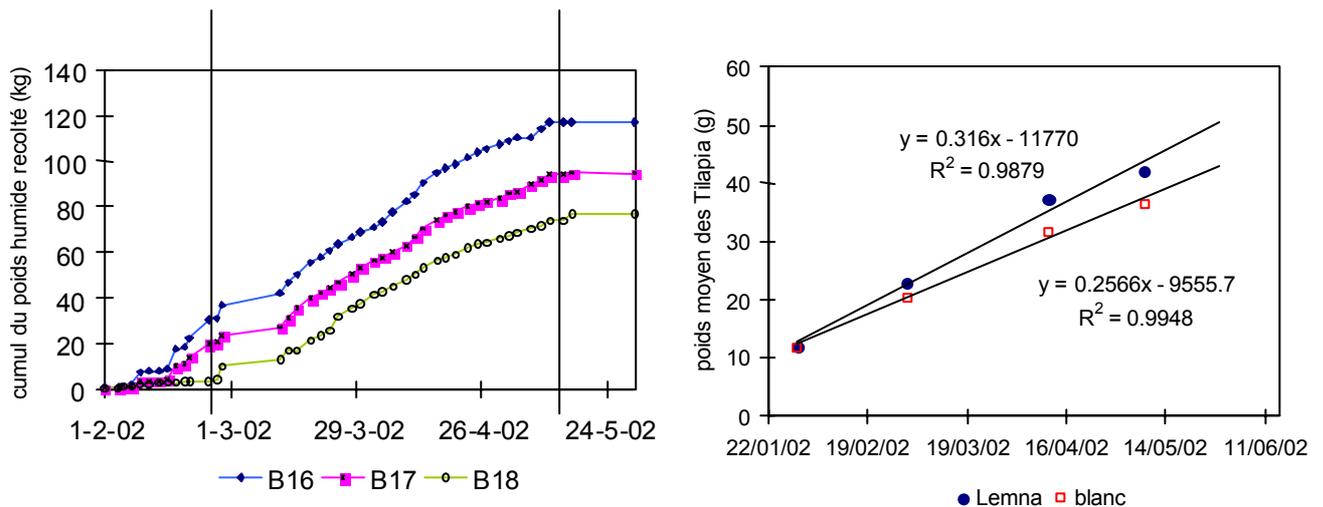


Figure 13: Evolution du poids récolté dans les bassins à macrophytes (a) et du poids des Tilapia dans les bassins de pisciculture (b). La deuxième ligne verticale indique le moment où la température et l'ammonium dépassent les valeurs limites (30 mg/l pour NH<sub>4</sub>-N et 32°C) pour les lentilles

Le Tableau 12 compare les résultats des expériences de Guyaba à Cuba avec production de lentilles d'eau. Malgré les paramètres physico chimique assez différente des eaux usées à l'entrée des stations,

et des temps de séjour très différentes, les rendements de production sont comparables. La production de biomasse à Niamey peut paraître plus élevée, cependant elle a baissé du début de l'expérience d'environ 1000 à 500 vers la fin de l'expérience. Par ailleurs le temps de séjour de l'eau étant moins important, l'effet d'épuisement des ressources nutritives et sans doute plus limité. Les ordres de grandeur de production de lentilles suggérés par Skillicorn et al. (1993) sont de 0.05 à 0.15 kg/ha/j, ce qui est tout à fait dans la gamme de ce que nous avons pu constater à Niamey.

Une première évaluation économique peut être réalisée sur la base de la valeur commerciale des Tilapia, soit environ 800 à 1000 CFA le kilo selon la saison et l'arrivée. La production totale de poissons a été de 4 kilos de poids frais sur 3 mois. Ils ont été alimentés avec les lentilles produites sur une surface de 5 m<sup>2</sup> sur les 42 m<sup>2</sup> au total (bassins B16 à B18). Pour atteindre le revenu typique d'un maraîcher (1000000 CFA par an), il faudrait pouvoir utiliser les lentilles produites par un système environ 6 fois plus grand que la filière lemna mise en oeuvre à l'UAM dans le cadre de ce projet, soit une surface totale de bassins de 600 m<sup>2</sup> (150 équivalents-habitants, 20 m<sup>3</sup>/jour en équivalent-UAM) pour moitié en microphytes et pour moitié en macrophytes, plus les bassins d'élevage des tilapias.

Certes ces calculs restent grossier, et évaluent encore mal les différentes charges qui devraient être prises en compte dans une installation en vraie grandeur ou encore une meilleure gestion de l'alimentation des poissons. Cependant, la station type proposée reste à taille humaine (inférieure en surface au 4200 m<sup>2</sup> du maraîcher de Niamey), donc probablement gérable par le même personnel. Elle génère par ailleurs le même revenu, mais à l'inverse de l'exploitation maraîchère, elle intègre le bon fonctionnement du système d'épuration. Par ailleurs, il est toujours possible de valoriser à nouveau l'eau sortant du système en maraichage.

Tableau 12 : Comparaison des systèmes de CENHICA et celui de UAM / Aquadev

		CENHICA (Santiago 1997)		UAM	
Lagune	Compartiments	1		3	
Lagune de culture	profondeur (m)	0.5		1.5	
	superficie (m <sup>2</sup> )	3 000		42	
Débit	(m <sup>3</sup> /j)	< 8.6		3.3	
Temps de séjour	(j)	> 100		14	
Charge en DBO	(kg-O <sub>2</sub> /ha.d)	1.8		120	
Espèce		Lemnacées		Lemnacées	
Biomasse	(kg p.hum./ha)			2300	
Production	(kg p.hum./ha/j)	590 - 680		500 - 1500	
		<b>Influent</b>	<b>Effluent</b>	<b>Influent</b>	<b>Effluent</b>
PH		7.4	7.5	6.8 - 7.3	7.9 - 8.9
Conductivité	(μS/cm)	2960	-	662	440
MES	(mg /l)	1420	120	238	99.6
BOD	(mg-O <sub>2</sub> /l)	378	-	312	98.9
DCO	(mg-O <sub>2</sub> /l)	1098	250	617	233
NH <sub>4</sub>	(mg-N/l)	143	9.3	45.7	12.8
PO <sub>4</sub>	(mg-P/l)	56	2	3.91	0.7
Coli fécaux	(nr/100ml)	10 <sup>5</sup>	-	2.7 10 <sup>7</sup>	8.5 10 <sup>3</sup>

## 5.4. Conclusions

L'eau est le sous-produit de l'épuration par lagunage le plus ré-utilisé aujourd'hui en Afrique de l'Ouest, les macrophytes n'étant utilisées qu'à titre expérimental. Les données des enquêtes montrent que la réutilisation a lieu là où les ressources naturelles sont insuffisantes. On trouve ainsi une réutilisation fréquente dans les pays comme le Niger, le Burkina et le Sénégal, mais quasi absente dans les pays comme Cameroun, Ghana ou le Cuba. Cette observation a été confirmée et renforcée pendant le séminaire par les gestionnaires du pays de Maghreb, le Maroc et la Tunisie. Au Maroc dans les régions atlantiques la réutilisation est quasi inexistante du aux apports des précipitations, tandis que en Tunisie plus que 30% de la production d'eau usée est réutilisée (Kundi, 2002, Bahri 2000).

Cependant, même si en situation de pénurie l'utilisation des eaux traitées pour l'irrigation peut paraître une solution intéressante que de nombreux maraîchers sont prêts à mettre en œuvre même s'ils doivent payer pour accéder à l'eau, il est probablement illusoire de penser que la vente de l'eau permettra de couvrir les frais de fonctionnement de la station. En effet, les promoteurs agricoles qui se sont dits prêts à payer l'eau ont en réalité surévalué leurs possibilités de paiement, dans les conditions économiques actuelles. Ainsi, la vente de l'eau traitée ne pourra probablement pas couvrir une partie significative des frais de fonctionnement de la station. L'eau ainsi distribuée pour les cultures devrait être gratuite ou presque, distribuée dans des conditions d'utilisation aisées, et avec le contrôle sanitaire indispensable (qui pourrait être financé par la vente de l'eau).

L'idée de vendre les matières nutritives portées par l'eau n'est pas économiquement viable étant donné le faible coût d'achat des engrais qui entreraient alors en concurrence avec l'eau traitée. D'un point de vue environnemental l'apport de matières nutritives par des engrais en cas de réutilisation d'eaux traitées devrait devenir pratiquement nul pour éviter une surcharge en nutriment et une exportation excessive vers le milieu naturel (nappe). Ce problème pourrait apparaître à grande échelle dès lors que des installations de grande taille avec réutilisation seraient construites.

La mise en œuvre d'une réutilisation de l'eau épurée nécessite un minimum d'infrastructure garantissant à la fois un suivi sanitaire des eaux utilisées et la stabilité des promoteurs agricoles concernés, ce qui implique une situation foncière stabilisée.

Notre expérience a mis en évidence la possibilité et le potentiel économique d'un traitement des eaux usées, combiné avec de l'aquaculture. La grande différence entre la réutilisation pour l'aquaculture et la réutilisation pour la maraîchage est que l'aquaculture est directement intégrée au traitement des eaux. Ainsi le pisciculteur doit assurer le bon fonctionnement de la station de lagunage pour que son activité économique fonctionne, alors que le maraîcher se contente aisément d'eaux imparfaitement traitées. Par ailleurs l'entretien de la station (dont l'enlèvement des lentilles) est en elle-même une partie de l'exploitation piscicole du site, et non une surcharge de travail qu'un maraîcher réutilisateur impliqué dans la gestion d'une lagune aurait à accomplir. En termes de revenus, nous estimons qu'un système d'épuration de moins de 1000 m<sup>2</sup> (environ 150 équivalents-habitants) serait capable de fournir un revenu de 1000000 CFA annuellement par la vente de poissons. Reste à valider le procédé en termes sanitaires pour que la vente des poissons puisse être effective et permette le financement des charges d'exploitation du système.

## 6. Les échanges

### 6.1. Programme

Dans le cadre du programme pS Eau différents échanges ont été organisés entre les partenaires du projet.

Une visite de l'EIER à la station de UAM a été effectuée début mars et a permis à l'équipe de l'EIER de se faire une idée du potentiel des installations disponibles à Niamey. Niamey possède actuellement 3 stations pilotes : (1) lagunage UAM & Aquadev, (2) UASB et (3) Mini boue activée - JYOCASSO. La station de lagunage de l'EIER est en réflexion et de ce fait, celle de l'UAM de Niamey est pour le moment la plus adaptée pour des actions de recherche pratique. Cependant, il n'y a ni formation, ni programme de recherche dans ce domaine à Niamey. La faculté de sciences de l'UAM et notamment le département de chimie pourrait accueillir une telle formation dans le futur. Dans le cadre d'échanges EIER - UAM un programme de collaboration va être institutionnalisé (une demande officielle de collaboration est en cours de préparation). Ainsi fin avril deux étudiants de l'EIER ont passé un stage pratique au sein de l'équipe UAM - Aquadev dans le cadre de notre projet.

### 6.2. Séminaire

L'enquête a déjà permis de mettre en contact les chercheurs de l'EIER avec la plupart des acteurs dans le domaine de l'assainissement en Afrique de l'Ouest. Grâce au soutien de l'AFD, le séminaire de restitution initialement prévu dans le projet a pu être transformé en un séminaire de plus grande ampleur, tirant parti des nombreux contacts noués au cours des enquêtes de terrain.

Ouagadougou a été choisi pour plusieurs raisons. D'une part l'organisation s'appuyait sur l'événement Envirowater 2002 où une grande partie des partenaires était déjà présente. D'autre part l'ONEA est en train de construire une des plus grandes stations de lagunage en Afrique de l'Ouest. Les fonds supplémentaires mis à disposition ont permis de rassembler outre les partenaires du projet une grande partie des gestionnaires de l'assainissement de la sous-région et quelques experts étrangers.

Ouvert à tous les participants désireux d'échanger dans le domaine de lagunage, le séminaire intitulé "Traitement des eaux usées par lagunage : Challenges et perspectives pour les pays en voie de développement" s'est déroulé la veille de la conférence Envirowater 2002, le 4 novembre 2002.

L'intérêt porté au sujet et la participation au séminaire ont dépassé les prévisions. Plus de 43 participants de 13 pays se sont réunis pour partager et échanger leurs connaissances dans le domaine de traitement des eaux usées par lagunage. 20% des participants représentaient les gestionnaires et les exploitants africains.

Les sujets traités durant les débats consistaient principalement en questions pratiques sur la gestion des systèmes de lagunage en vue de la réutilisation de sous-produits. Deux volets peuvent être distingués, celui de l'eau traitée et celui des plantes aquatiques.

La réutilisation des eaux traitées est principalement gérée par la demande. Les pays avec un excédant hydrique comme le Cameroun et le Ghana n'en réutilisent quasiment pas, tandis que les pays comme le Sénégal, la Tunisie ou le Maroc font de grands efforts. Une problématique qui se superpose est celle du financement de l'assainissement. Les gestionnaires qui travaillent dans une structure où un système de type redevances est en place (Tunisie, Maroc) possèdent des moyens financiers beaucoup plus importants que ceux qui travaillent seulement avec des attributions ministérielles (Niger, Ghana, Sénégal).

Beaucoup de questions concernaient les normes appliquées pour pouvoir utiliser, sans risques sanitaires, les eaux traitées en irrigation ou en arrosage. Les futures normes de l'OMS vont être plus restrictives encore pour garantir la meilleure sécurité sanitaire, alors que les normes actuelles sont le

plus souvent inappliquées en Afrique de l'Ouest. Les approches diffèrent entre les pays. Faut-il adapter la réutilisation à la qualité de l'effluent ou l'effluent à la réutilisation envisagée ? Faut-il les mêmes normes partout, alors que les enjeux socio-économiques sont très différents d'un pays à l'autre ? Evidemment aucune réponse globale n'a pu être apportée à ces questions, mais il était très important qu'elles soient posées et que les points de vues soient échangés.

L'utilisation des plantes aquatiques pour le traitement des eaux usées a suscité une polémique entre les gestionnaires d'une part et entre les gestionnaires et les chercheurs d'autre part. Plusieurs exploitants et chercheurs ont utilisé les plantes aquatiques en vue d'améliorer les traitements. Certains exploitants du sud ont la conviction que les plantes apportent une amélioration. Cependant les chercheurs français n'ont pas trouvé une amélioration significative du bilan annuel dans des lagunes à macrophytes (comparées aux microphytes) en grandeur réelle en situation française, les lagunes à macrophytes n'étant plus conseillées aujourd'hui. Il faut bien distinguer entre l'utilisation exclusivement pour le traitement et l'application dans une culture des plantes aquatiques en vue de leur extraction et leur utilisation. Les essais d'utilisation des plantes aquatiques ont porté des fruits à Cuba et au Niger, mais ont connu un échec au Maroc. Il s'avère que le dimensionnement, le type d'eau traitée et les conditions d'exploitation jouent un rôle primordial.

Un troisième point de débat concernait l'échange entre les partenaires. Beaucoup des gestionnaires et d'exploitants se sont rencontrés pour la première fois. Tous les participants ont affiché clairement leur désir de poursuivre les échanges engagés et de participer à un réseau des connaissances à conditions que ce réseau soit animé par un modérateur. Cette idée rejoint l'hypothèse émise dans le projet initial, sur le lagunage et la valorisation des sous produits, sur le besoin d'un réseau structuré d'accompagnement et d'échange dans le domaine d'assainissement collectif. Une proposition de création d'un tel réseau a été envoyée aux participants au courant du mois de décembre, elle devrait aboutir à une proposition de constitution au début 2003.

## 7. Conclusions et perspectives

Le lagunage paraît être aujourd'hui une technologie de traitement tout à fait réaliste pour l'Afrique. Beaucoup de scientifiques et d'exploitants montrent un intérêt marqué pour cette technique, et ont les connaissances nécessaires pour qu'elle puisse effectivement se développer.

Dans les pays où les conditions hydrographiques sont défavorables (Niger, Burkina Faso, Sénégal ... ) la réutilisation de l'eau (effluents traités) devrait être stimulée à l'aide des projets de démonstration. Les projets devront enseigner les avantages de la réutilisation sans oublier les aspects sanitaires.

Le développement maîtrisé de macrophytes devrait être perçue non seulement comme une possibilité d'améliorer le niveau de traitement, mais aussi du point de vue de production d'une biomasse économiquement attractive, permettant de pérenniser le système et son fonctionnement.

A moyen terme ces objectifs pourront être atteints par

- une mise en réseau "modérée" des partenaires et des acteurs rencontrés, par biais de la création d'un point de rencontre virtuel, qui permettrait un échange rapide des nombreux travaux et bilans réalisés dans les universités et centres techniques africains, sous forme d'une bibliothèque virtuelle sur le lagunage et la réutilisation des sous-produits, où chacun puisse diffuser son savoir et être reconnu.
- la poursuite de l'accompagnement scientifique des équipes comme celle de Niamey car la demande locale dépasse l'offre,
- l'extrapolation d'expériences pilote vers une échelle grandeur nature pour valider réalité économique. Une telle opération avait été tenté par ENDA à Rufisk,
- sans oublier la mise en place d'une structure d'expertise et de suivi de stations de lagunage (et de traitement en général) en adaptant par exemple le système des SATESE français à l'Afrique de l'Ouest. Un grand SATESE pour l'Afrique de l'ouest, capable de déployer son savoir-faire sur les sites mêmes par des actions de suivi et conseils localisées dans le temps, serait un moyen très efficace de suivi et de valorisation des expériences, et de diffusion des connaissances.

## 8. Documents produits

### 8.1. Publications scientifiques

1. Lentille d'eau et Tilapia : une solution écologique pour le traitement des eaux usées dans les pays en voie de développement Duckweed - Tilapia system : a possible way of ecological sanitation for developing countries (2002) Par Martin Seidl, Sani Laouali, Tahar Idder et Jean-Marie Mouchel *Présentation pour le 4<sup>ième</sup> congrès international Envirowater 2002, le 5-7 novembre 2002 à Ouagadougou. 10p.*
2. Valorisation des sous-produits de l'épuration par lagunage en Afrique de l'Ouest et du Centre : Analyse comparative des pratiques dans six pays au Sud du Sahara. (2002) Par Amadou Hama **Maiga**, Joseph Wéthé, Martin Seidl, Jean-Marie Mouchel, Abdrahamane Dembélé. *Présentation pour le 4<sup>ième</sup> congrès int. Envirowater 2002, le 5-7 novembre 2002 à Ouagadougou. 10p.*
3. "Traitement des eaux usées par lagunage : Challenges et perspectives pour les pays en voie de développement". *Document de travail du séminaire du 4 novembre 2002 à Ouagadougou 50p.*
4. Site web [www.h2o.net/lagunage.htm](http://www.h2o.net/lagunage.htm)

### 8.2. Mémoires des étudiants ayant participé au projet

5. Epuration par lagunage des eaux usées pour une réutilisation en agriculture urbaine : étude comparative des sites expérimentaux de Ouagadougou (BF) et de Niamey (Niger). (2002) **Claire l'Huillier**, mémoire de DESS du Génie des procédés de traitement des eaux. de l'Université des Sciences et Techniques à Lille, France
6. Analyse des performances et diagnostic du potentiel de réutilisation des sous produits de l'épuration dans la ville de Niamey".(2002): **Abdou Aboubacar**, Mémoires de fin d'études d'ingénieur de l'équipement rural de l'EIER à Ouagadougou Burkina Faso.

### 8.3. Rapports produits par les partenaires

7. Valorisation des eaux usées par lagunage dans les pays en voie de développement : étude des cas du Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Ghana et Sénégal. Volume I : Rapport Scientifique, par A.H. Maiga, J. Wethe, A. Dembele et A. Klutse. 82 pages + annexes.
8. Valorisation des eaux usées par lagunage dans les pays en voie de développement : étude des cas du Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Ghana et Sénégal. Volume II : Monographie des stations étudiées, par A.H. Maiga, J. Wethe, A. Dembele et A. Klutse. 28 pages + annexes
9. Capacité d'épuration des lentilles d'eau sous conditions africaines et valorisation de la biomasse produite; par S.M. Laouali et M. Seidl. 19 pages + annexes.
10. Contribucio al estudio de los sistemas de lagunas de oxidacion y a la utilizacion de las macrofitas en el tratamiento por lagunas : la experiencia cubana, par J.F. Santiago Fernadez, 36 pages.
11. Séminaire "Traitement des eaux usées par lagunage : challenges et perspectives pour les spays en voie de déveloepement". Résumé des communications, par M. Seidl et J.M. Mouchel.

## 9. Liste de références utilisées

- ANSERSON J., ADIN A., CROOK J., DAVIS C., HULTQUIST R., JIMENEZ-CISNEROS B., KENNEDY W., SHEIKH B., VAN DER MERVE B. (2001). Climbing the ladder : a step by step approach to international guidelines for water recycling. *Water Science and Technology*, 43(10):1-8.
- AGUIRRE HERNANDEZ, AYMEE. (2002). Los recursos hidráulicos en cifras. *Voluntad hidráulica. Edición especial. Año XL. 2002. p 15 – 19.*
- ALAERTS G. J., RAHMAN MAHBUBAR P., KELDERMAN P. (1996) Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon water research : 1996, vol. 30, no 4, pp. 843 - 852 [ 10 pages. ]
- APHA, AWWA, WPCF. (1980). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastes.*
- BECERRA, M. (1991). " Azolla - Anabaena. Un recurso valioso para la producción agropecuaria en el trópico ". CIPAV . Colombia.
- BOON YANG, L. (1986) "Piggery Waste Treatment. Phase I. Reclamation of Nutrients, Water and Energy from Waste". IDRC-MR124e.
- BUELNA,G.; K.K. BHATHARAI; J. DE LA NOÛE; E.P. TAIGANIDES. "Evaluation of Various Flocculants for the Recovery of Algal Biomass Grown on Pig Waste".1990) *Biological Wastes* No31.
- CAMARA A. (1997). Evaluation stratégique du maraîchage dans le futur paysage urbain de Ouagadougou. Mémoire de recherche pour les études postgrade en Ingénierie et Management de l'Environnement, EPFL, Lausanne, Oct. 1997, 52p.
- CHARBONNEL, YVES (1989) *Manuel du lagunage à macrophytes en régions tropicales. Rapport ACCT (Agence de Coopération Culturelle et Technique -13,quai André Citroen - 75015 Paris )*
- CIEH, Comité interafricain d'études hydrauliques, (1993). *Etude comparative des systèmes d'épuration collectifs dans le contexte africain. Réalisation BCEOM, Ouagadougou, 66 P*
- CISSE G., (1997)) *Impact sanitaire de l'utilisation d'eaux polluées en agriculture urbaine. Cas du maraîchage à Ouagadougou. Thèse de doctorat, EPFL, Lausanne, 267p.*
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Secretaría General de Obras. (1992). "Memorias, Programa de Uso Eficiente del Agua". México DF.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Secretaría General de Obras. (1994). "Planta de Tratamiento Cerro La Estrella". México DF.
- EDWARDS P., HASSAN M. S., CHAO C. H. AND PACHARAPRIKITI C. (1992) *Cultivation of duckwoeds on septage-loaded earthen ponds. Biosource Tech* 40, 109-117.
- FABY J.A. & F.BRISSAUD (1997)) *L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation FNDAE, OIEAU 125p. www.oieau.fr (exemples de l'utilisations en France, ( site de Porquerolles)*
- FONTANILLS SEISDEDOS, LUIS A. (2002). Dos compromisos con el pueblo: agua potable y saneamiento ambiental. *Voluntad hidráulica. Edición especial. Año XL. 2002. p 34 – 37.*
- GUENE O., (1989) *Contribution à l'étude du fonctionnement et de la modélisation de l'épuration de la pollution carbonée et microbienne des lagunes naturelles sous climat sahélien : cas de la STEP pilote de l'EIER. Rapport de recherche pour le cycle d'études postgrades en Ingénierie de l'environnement EPFL Lausanne. novembre 1989, 65 pages.*
- HAUSER, J.R. (1984) "Use of Water Hyacinth Aquatic Treatment Systems for Ammonia Control and Effluent Polishing". *Journal WPCF Vol 59.*
- HAUSTEIN, A.T. GILMAN, W.R. and SKILLICORN P.W.(1990) *Duckweed, a useful strategy for feeding chickens in third world countries : performances of Layers fed with sewage-grown Lemnaceés . Poultry Science* 69(1990):1835-1844
- HAUSTEIN, A.T. GILMAN, W.R. SKILLICORN P.W. et al (1994) *Performance of broiler chickens fed diets containing duckweed (lemna gibbba) J. Agricult.Sci* 1994(122):285-289
- HEATON, R.D. (1981) " Worldwide Aspects of Municipal Wastewater Reclamation and Reuse. *Municipal Wastewater in Agriculture*". Academic Press. New York.
- HILLMAN, W.S.; D.D. CULLEY, (1978). "The Uses of Duckweed". *American Scientist Vol 66.*
- HUMBERT P, G. (2000) *Le lagunage à macrophytes. Etude hydrodynamique et performances épuratoires des bassins à laitues d'eau de l'EIER, travail pratique de diplôme EPFL, Génie Rural, Lausanne, mars 2000, 48 pages.*

- IBARRA, R. (1995). "Comunicación personal"
- IDDER, T. & LAOUALI S.M. (2000) Experiences pilote (Aquadev- UAM Niamey) de traitement des eaux usées urbaines par lagunage Séminaire International sur l'Assainissement Urbain en Afrique, Dakar-Gorée, 18-12-2000
- JOURNEY, W.K.; P. SKILLICORN; W. SPIRA, (1991) " Duckweed Aquaculture. A New Aquatic Farming System for Developing Countries". The World Bank. Emena Technical Department.
- KONE D. (1999) Epuración des eaux usées par lagunage en Afrique de l'Ouest : Evaluation des performances épuratives des stations existantes et étude de cas : Rapport annuel interne 1999, EIER, Ouagadougou 47 P
- KORNER S., LYATUU G. B., VERMAAT J. E. (1998) The influence of Lemna Gibba L. on the degradation of organic material in duckweed-covered domestic wastewater Water research :1998, vol. 32, no 10, pp. 3092 - 3098 [ 7 pages. ]
- LANDOLT, E. (1980) "Byosistematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae)" Volume 1 Geobotanical Institute. ETH. Zurich. 247 pages.
- LANDOLT, E. (1986). " The family of Lemnaceae. A monographic study". Volume 1. ETH Zurich.
- LENG, R.A. (1994). Director of the Centre for Duckweed Research and Development. University of New England. Armidale. Australia. " Comunicación personal "
- LENG, R.A.; J. H. STAMBOLIE; R. BELL. (1994). " Duckweed - a potencial high-protein feed resource for domestic animals and fish ". Centre for Duckweed Research and Development. University of New England. Armidale. Australia.
- MAÏGA A. H., D. KONE , C. SEIGNEZ ET C. HOLLIGER (2000) Le traitement des eaux usées par lagunage : une décennie de recherche à l'EIER, Ouagadougou - Burkina Faso Séminaire International sur l'Assainissement Urbain en Afrique, Dakar-Gorée, 18-20 décembre 2000
- MARA D. and PEARSON H. (1998). Design manual for waste stabilization ponds in Mediterranean countries. Lagoon Technology International, Leeds, England. pp 113.
- MBAGWU I.G. and ADENIJI H.A. (1988) Nutritional content of duckweed in the Kainji lake area, Nigeria. Aquat; Bot 1988(29):357-366
- ORON G. D. PORATH and H. JANSEN (1987) Performance of the duckweed species Lemna gibba on municipal wastewater for effluent renovation and protein production Biotech.Bioeng 1987(29):258-267
- ORON, G. (1994) Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production. Agricult. Water Management 1994(26):27-40
- ORON, G.; D.PORATH; H.JANSEN. (1987). "Performance of the Duckweed Species Lemna Gibba on Municipal Wastewater for Effluent Renovation and Protein Production". Biotechnology and Bioengineering. Vol. XXIX.pp. 258-268.
- ORON, G.; D.PORATH; L. WILDSCHUT. (1986) "Wastewater Treatment and Renovation by Different Duckweed Species" Journal of Environmental Engineering. Vol. 112 No. 2 April.
- PRISM. (1991). " Zona de agrosaneamiento para Ferreñafe". Perú.
- REDDY K. R. & DE BUSK W. F. (1985) Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes. J. environ. Qual. 14, 459-462.
- RIGGLE D.1998 Combining duckweed and high rate anaerobic treatments Biocycle. [ Biocycle. ], 1998, vol. 39, no 2, pp. 64 - 65 [ 2 pages. ]
- SANTIAGO, J. F; M. DEL C. NOVOA; A. CANO; A. CERVANTES (1997) Tratamiento de Residuales porcinos y domesticos mediante el cultivo de Lemna. Voluntad Hidraulica (87):54-60
- SANTIAGO, J.F.; A. CANO; J. CERNUDA. (1992). "Acerca de las posibilidades de tratamiento final para residuales porcinos mediante el cultivo de lemnácea". 1er. Encuentro Nacional. Integración entre economía y ecología. Academia de Ciencias, 1987.
- SANTIAGO, J.F.; M. DEL C. NOVOA; A. CANO; A. CERVANTES. (1993) "Tratamiento de residuales líquidos con vistas a su reutilización. Cultivo de Lemna (lemnácea)". Informe de etapas cumplimentadas durante las investigaciones desarrolladas. CENHICA . INRH. 45 pag..
- SANTIAGO, JOSE FRANCISCO; BEATO O.; PLAZA I. (1999). Solución para la disposición del efluente de la laguna de oxidación de los residuales del hotel Les Breezes Jibacoa. Informe Final. INRH. La Habana. Cuba.
- SEIDL M. & MOUCHEL J.M. (2002). Séminaire "Traitement des eaux usées par lagunage : challenges et perspectives pour les pays en voie de développement", résumé des communications. Ouagadougou, 4 novembre 2002.
- SEKIRANDA, S.B.K. & S. KIWANUKA (1998) A study of nutrient removal efficiency of Phragmites mauritanus in experimental reactors in Uganda Hydrobiologia 364 :83-91
- SKILLICORN, P.; W. SPIRA; W. JOURNEY. (1993). "Duckweed Agriculture. The New Aquatic Farming System for Developing Countries". The World Bank. Washington DC. USA.

STEEN P. A. BRENNER & G. ORON (1998) An integrated duckweed and algae pond system for nitrogen removal and renovation. *Water.Sci. Tech.* (38):335-343

UNEP (1997) Appropriate technology for sewage pollution control in the wider Caribbean region. United Nation Env. Program rapport and appendix 195p [www.unep.org](http://www.unep.org)

VAN der STEEN P., BRENNER A., VAN BUUREN J., ORON G. (1999) Post-treatment of UASB reactor effluent in an integrated duckweed and stabilization pond system *Water research* : 1999, vol. 33, no 3, pp. 615 - 620 [ 6 pages. ]

VERMAAT J. E., KHALID HANIF M. 1998 Performance of common duckweed species (Lemnacées) and the waterfern *Azolla Filiculoides* on different types of waste water *Water research* : (1998), vol. 32, no 9, pp. 2569 - 2576 [ 8 pages. ]

WHITEHEAD, A.J. LO K.V. and BULLEY N.R. (1987) The effect of hydraulic retention time and duckweed cropping rate on nutrient removal from dairy barn wastewater IN: *Aquatic plants for wastewater treatment and resources recovery* Reddy K.R. and Smith W.H. editors Magnolia Publishing Orlando Florida

ZIRSCHKY J. & REED S. C. (1988) The use of duckweed for wastewater treatment. *Wat.Poll.Cont.Fed* 60, 1253-1258.

**COPYRIGHT © 2003**

Centre d'Enseignement et de Recherche Eau Ville Environnement,  
centre conjoint de l'ENGREF, de l'ENPC et de l'UPVM

6 – 8 Avenue Blaise Pascal  
Champs sur Marne  
77455 Marne la Vallée Cedex 2  
[www.enpc.fr/cereve](http://www.enpc.fr/cereve)

Fax: +33 1 64 15 37 64  
Tél.: +33 1 64 15 39 75