

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES D'INGENIEUR
MASTER 2^{ème} ANNEE

**COMPARAISON DE DEUX MODES
D'ÉCHANTILLONNAGE DANS L'ÉTUDE DES
PERFORMANCES ÉPURATOIRES DU
LAGUNAGE SOUS CLIMAT SAHÉLIEN**

Présenté par :

DIARRASSOUBA Lassina Lohona

Encadreurs :

Amadou Hama MAIGA

Joseph WÉTHÉ

Kokou DENYIGBA

Yacouba KONATÉ

Année académique 2006-2007

DEDICACE

A MA FAMILLE.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, j'aimerais remercier l'Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et l'Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche en Gestion et Valorisation de l'Eau et de l'Assainissement (UTER – GVEA) dudit institut pour la qualité de la formation que nous avons reçu pendant tout notre cycle.

Je tiens à remercier toute l'équipe du Laboratoire de Contrôle des Pollutions et des procédés de traitement des eaux (LCP-Eau) du 2iE de nous avoir permis d'effectuer le stage dans de bonnes conditions.

Mes remerciements sont adressés au Prof. Amadou Hama MAIGA, Directeur de la recherche et du LCP-Eau qui, malgré les contraintes liées à ses fonctions, a su consacrer du temps pour nous orienter dans notre travail.

Je remercie également Dr Joseph WÉTHÉ, Kokou DENYIGBA et Denis ZOUNGRANA pour leur soutien et leurs précieux conseils pour l'avancement de nos travaux.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Yacouba KONATÉ pour sa disponibilité et son appui indéfectible pendant toute la durée de notre stage.

J'adresse également mes vifs remerciements à messieurs SAWADOGO Omar, AFANGNON Dieudonné et BYLL-CATARIA, pour leur aide précieuse et constante au cours des analyses au laboratoire.

J'exprime ma reconnaissance aux stagiaires TOUGOUMA Salimata et BONTOGHO Patricia qui m'ont apporté une grande aide au cours des prélèvements d'échantillons et des analyses au laboratoire.

AUTEUR : DIARRASSOUBA Lassina Lohona

Encadreurs :
A. H. MAIGA
J. WÉTHÉ
K. DENYIGBA
Y. KONATÉ

Organisme d'accueil : 2iE

THÈME :***Comparaison de deux modes d'échantillonnage dans l'étude des performances épuratoires du lagunage sous climat sahélien*****RÉSUMÉ**

Le présent travail est consacré à la comparaison de deux modes d'échantillonnage dans l'étude des performances épuratoires du lagunage sous climat sahélien. L'objectif poursuivi est de trouver une méthode d'échantillonnage simple et rapide dans l'étude des performances épuratoires du lagunage. Une première partie de l'étude axée sur l'évaluation des performances épuratoires de la filière à trois bassins de lagunage du 2iE, dans les conditions climatiques soudano sahéliennes, a permis d'obtenir les rendements épuratoires moyens de 92% pour la DBO₅, 77% pour la DCO et 43% pour les MES. Ces rendements sont satisfaisants puisque les teneurs résiduelles moyennes de 17 mg/l en DBO₅, 90 mg/l en DCO et 83 mg/l pour les MES sont toutes inférieures aux seuils fixés par la réglementation européenne (Council of the European Communities, 1991). Les taux d'élimination des nutriments sont de 48% pour l'azote ammoniacal, 31% pour les nitrates et 10% pour les orthophosphates. Les teneurs résiduelles atteignent alors 17,2 mg/l en azote ammoniacal, 1,4 mg/l en nitrates et 4,6 mg/l en orthophosphates. De manière globale, l'élimination de l'azote et du phosphore est faible et les teneurs résiduelles restent assez élevées par rapport à la limite tolérable pour un rejet d'effluent dans un écosystème sensible à l'eutrophisation.

La seconde partie de l'étude est consacrée à la comparaison de l'échantillonnage composite de 24 heures et de l'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* » en vue de savoir si ce dernier permet aussi d'obtenir des échantillons représentatifs d'un échantillon moyen journalier. L'étude révèle qu'il n'y a aucune différence significative entre les valeurs obtenues à l'aide des deux modes d'échantillonnage, pour chacun des paramètres analysés (test ANOVA, IC = 95%, $p > 0,05$). Cela permet de dire que l'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* » est une méthode rapide, simple et efficace pour obtenir des valeurs moyennes journalières d'un effluent permettant d'étudier les performances épuratoires d'une filière de lagunage en zone sahélienne.

Mots clés : Echantillonnage, performances épuratoires, lagunage, *water column sampler*

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : *Caractéristiques des différents bassins de la filière I*

Tableau 2 : *Nombre d'équivalent-habitant de la station évalué à partir des données de la DESA, 2007*

Tableau 3 : *Paramètres et méthodes d'analyses*

Tableau 4 : *Caractéristiques des eaux brutes admises dans la station de traitement*

Tableau 5 : *Valeurs moyennes des paramètres analysés dans chaque bassin*

Tableau 6 : *Valeurs moyennes des paramètres des échantillons de colonne du bassin anaérobie*

Tableau 7 : *Comparaison des valeurs moyennes journalières des données du bassin anaérobie basée sur des séries d'échantillons composites de 24 heures et des échantillons de colonne*

Tableau 8 : *Valeurs moyennes des paramètres des échantillons de colonne du bassin de maturation*

Tableau 9 : *Comparaison des valeurs moyennes journalières des données du bassin de maturation basée sur des séries d'échantillons composites de 24 heures et des échantillons de colonne*

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

Figure 2 : Schéma général de la filière I de lagunage à microphytes de la station expérimentale du 2iE

Figure 3 : Schéma d'un système classique de lagunage à microphytes.

Figure 4 : Dispositif d'échantillonnage automatique stationnaire

Figure 5 : Schéma de la méthodologie de travail.
d'échantillons (1987)

Figure 6 : Point de prélèvement d'échantillons à l'aide du « water column sampler »

Figure 7 : Dispositif de prélèvement d'échantillons de colonne confectionné au 2iE (LCP-Eau, 2007)

Figure 8 : Dispositif du « water column sampler » utilisé par Pearson pour les prélèvements

Figure 9 : Séance de prélèvement d'échantillons au « water column sampler ».

Figure 10 : Rendements d'élimination de la DBO_5 pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE

Figure 11 : Rendements d'élimination de la DCO pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE

Figure 12 : Rendements d'élimination des MES pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

Figure 13 : Rendements d'élimination de l'azote ammoniacal pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

Figure 14 : Rendements d'élimination des nitrates pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

Figure 15 : Rendements d'élimination des orthophosphates pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

ABREVIATIONS

2iE : Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

EIER : Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural

LCP-Eau : Laboratoire de Contrôle des Pollutions et des Procédés de Traitement des Eaux

EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

AFNOR : Association Française de Normalisation

ISO : International Standardisation Organisation

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène au bout de 5 jours.

DCO : Demande Chimique en Oxygène

MES : Matières en suspension

N-NH₄⁺ : Azote ammoniacal

N-NO₃⁻ : Nitrates

P-PO₄³⁻ : Orthophosphates

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	1
REMERCIEMENTS	2
LISTE DES TABLEAUX	4
LISTE DES FIGURES	5
ABREVIATIONS	6
INTRODUCTION	9
CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE	10
1. INTRODUCTION	11
2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	11
3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	12
4. PRESENTATION DU SITE.....	12
CHAPITRE 2 : L'ÉCHANTILLONNAGE DANS L'ÉTUDE DES PERFORMANCES ÉPURATOIRES DU LAGUNAGE	14
1. INTRODUCTION	15
2. GENERALITES SUR LE LAGUNAGE A MICROPHYTES.....	15
3. INTERET DE L'ÉTUDE DES PERFORMANCES EPURATOIRES	16
4. GENERALITES SUR L'ECHANTILLONNAGE	16
4.1 Définitions	16
4.2 Différents types d'échantillons	17
4.2.1 Echantillons ponctuels.....	17
4.2.2 Echantillons prélevés de façon discontinue	17
4.2.3 Echantillons prélevés en continu	18
4.2.4 Echantillons composites.....	18
4.2.5 Echantillons de grand volume	19
4.3 Matériels d'échantillonnage	19
4.3.1 Généralités.....	19
4.3.2 Matériels d'échantillonnage pour analyses physico-chimiques.....	19
4.3.3 Matériels d'échantillonnage pour analyses microbiologiques.....	20
4.4 Transport et conservation des échantillons	20
5. LA PROBLEMATIQUE DE L'ECHANTILLONNAGE DANS LA QUALITE DES RESULTATS.....	21
6. FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE	23
7. CONCLUSION.....	23
CHAPITRE 3 : MATERIELS ET MÉTHODES	24
1. INTRODUCTION	25
2. APPROCHE METHODOLOGIQUE	25
3. PARAMETRES ANALYSES.....	27
3.1 Demande Biologique en Oxygène	27
3.2 Demande Chimique en Oxygène.....	27

3.3	Matières en suspension.....	27
3.4	Azote ammoniacal	28
3.5	Nitrates	28
3.6	Orthophosphates	28
4	. DONNEES HYDRAULIQUES.....	28
4.1	Caractéristiques hydrauliques des ouvrages.....	28
4.2	Evaluation de l'équivalent-habitants (EH).....	29
4.3	Estimation de la charge organique en DBO ₅	30
5	. MODES D'ECHANTILLONNAGE UTILISES.....	30
5.1	Echantillonnage composite.....	30
5.1.1	Points de prélèvement d'échantillons composites.....	30
5.1.2	Fréquence des prélèvements d'échantillons composites.....	31
5.1.3	Matériels de prélèvement d'échantillons composites.....	31
5.1.4	Conservation des échantillons	31
5.2	Echantillonnage de colonne.....	31
5.2.1	Points de prélèvement des échantillons de colonne.....	31
5.2.2	Fréquence de prélèvement des échantillons de colonne.....	32
5.2.3	Matériels de prélèvement des échantillons de colonne.....	32
5.3	Méthodes d'analyse des paramètres.....	36
5.3.1	Paramètres physico-chimiques globaux.....	36
5.3.2	Paramètres de pollution organique.....	37
5.3.3	Les nutriments.....	37
6	. CONCLUSION.....	38
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS		39
1.	INTRODUCTION.....	40
2.	RESULTATS DE L'ETUDE DES PERFORMANCES EPURATOIRES	40
2.1	Rendements épuratoires des paramètres de pollution organique	41
2.2	Discussion	43
2.3	Rendements épuratoires des nutriments.....	45
2.4	Discussion	47
2.5	Elimination de la pollution bactérienne et parasitaire	48
3.	COMPARAISON DES DEUX MODES D'ECHANTILLONNAGE.....	48
3.1	Comparaison des données du bassin anaérobie	49
3.2	Comparaison des données du bassin de maturation	50
3.3	Commentaire	52
3.4	Conclusion	53
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		54
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		56
ANNEXES		58

INTRODUCTION

Les pays d'Afrique et particulièrement ceux du Sahel, connaissent de graves difficultés, d'une part, pour l'alimentation en eau et, d'autre part, pour l'évacuation et le traitement des eaux usées. Les problèmes sont évidemment plus importants dans les centres urbains et sont dus à la combinaison de deux faits majeurs : les faibles ressources en eaux disponibles et la forte croissance démographique. L'une des alternatives pour faire face à cette situation est le traitement et la réutilisation des eaux usées. Les technologies intensives de traitement des eaux usées, notamment les boues activées adoptées par plusieurs pays africains, n'ont pas connu le succès escompté à cause de leur inadéquation avec le contexte socio-économique local caractérisé par une insuffisance de moyens financiers et techniques. Ainsi, le lagunage, procédé rustique et extensif d'épuration des eaux usées, apparaît comme la solution la mieux indiquée dans le contexte des pays sahéliens grâce à sa simplicité, sa souplesse et son faible coût d'installation et de maintenance. Le procédé d'épuration par lagunage a vu le jour en Afrique de l'ouest vers les années 80 [Koné, 2002]. C'est donc une technologie encore récente mais qui connaît un essor important au vu des différents travaux de recherche entrepris pour mieux maîtriser les paramètres de conception et les conditions optimales de son fonctionnement. En effet, un certain nombre de résultats très intéressants ont été obtenus en termes de rendements épuratoires des paramètres de pollution. Cependant, beaucoup de choses restent encore à découvrir dans ce domaine.

La présente étude que nous effectuons à la station expérimentale de l'Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) porte sur la « Comparaison de deux modes d'échantillonnage dans l'étude des performances épuratoires du lagunage sous climat sahélien ». Il s'agit, dans un premier temps, d'évaluer les performances épuratoires de la filière de lagunage à microphytes du 2iE en utilisant deux modes d'échantillonnage différents : l'échantillonnage composite de 24 heures et l'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* ». Dans un second temps, une étude comparative des deux modes d'échantillonnage sera faite par l'analyse des variances (ANOVA) en utilisant le logiciel XLSTAT. Le présent document qui est le rapport des travaux que nous avons effectué de mars à juin 2007 comporte 4 chapitres. Le 1^{er} chapitre est consacré à la présentation générale de l'étude. Le 2^{ème} chapitre est une synthèse bibliographique sur l'échantillonnage en évaluation des performances épuratoires. Dans les deux derniers chapitres, nous présentons respectivement, les matériels et les méthodes que nous avons utilisés pour nos travaux et le résumé des résultats que nous avons obtenus.

CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE

Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation générale de l'étude. Il s'agira de définir le cadre dans lequel se situe cette étude et sa problématique. Les objectifs visés à travers l'étude seront également clairement définis. Le chapitre se termine par la présentation du site d'étude.

1. Contexte de l'étude

La station pilote de traitement des eaux usées domestiques du 2iE a été construite en 1987. L'objectif principal poursuivi sur cette station est de contribuer à la maîtrise et à une meilleure intégration des techniques rustiques d'épuration au contexte socio-économique des pays de l'Afrique de l'ouest et du centre. Plusieurs projets de recherche ont été réalisés sur cette station dans le cadre de formations diplômantes (DEA, diplômes d'Ingénieurs EIER, EPFL et diverses grandes écoles du Sud et du Nord, Postgrades EPFL et Doctorats).

L'étude que nous menons s'inscrit dans le cadre d'un diplôme d'ingénieur et le thème abordé porte sur la comparaison de deux modes d'échantillonnage dans l'étude des performances épuratoires de la filière à microphytes.

Des travaux ont déjà été entrepris pour l'étude des performances épuratoires du lagunage sur la station pilote du 2iE (Klutsé, 1995 ; Koné, 2002 ; Maiga *et al.* 2006). La particularité de cette étude porte sur le fait que nous étudions les performances épuratoires en utilisant deux modes d'échantillonnage différents : l'échantillonnage composite de 24 heures et l'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* ».

En général, les études de suivi des performances épuratoires se font sur la base d'un échantillonnage moyen journalier pour un certain nombre de paramètres (cas des paramètres de pollution carbonée, azotée et phosphorée). Le mode d'échantillonnage est un échantillonnage composite de 24 heures effectué soit manuellement à un pas de temps de 1 à 3 heures soit avec un échantillonneur automatique réglé à une fréquence d'échantillonnage donnée (1h à 3h). Dans la quête de solutions moins contraignantes et surtout peu coûteuses, une méthode d'échantillonnage alternative a été testée au Nord-Est du Brésil par Pearson (1987) en utilisant un échantillonneur en colonne appelé « *water column sampler* ». Cette étude a aboutit à la conclusion que l'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* » est une méthode rapide et raisonnable pour l'obtention de valeurs moyennes journalières permettant de caractériser un effluent à la sortie d'un bassin de lagunage [Pearson et al, 1987]. Des conclusions similaires ont été rapportées à Loures au Portugal sur une filière à trois bassins de lagunage à microphytes composée d'un bassin anaérobie, d'un bassin facultatif et d'un bassin de maturation [Pearson et al, 1987]. Si cela a été prouvé au Brésil et au Portugal, en est-il de même au Burkina Faso, pays sahélien d'Afrique de l'Ouest ? Notre étude permettra non seulement de renforcer la base de

données existante sur les performances épuratoires de la filière à microphytes mais aussi d'expérimenter l'échantillonnage en colonne avec le « *water column sampler* » dans le contexte climatique sahélien. Si la similitude entre les résultats obtenus à l'aide de ces 2 méthodes est confirmée alors nous aurons contribué à trouver une méthode d'échantillonnage rapide et simple dans l'évaluation des performances épuratoires du lagunage en zone sahélienne.

2. Objectifs de l'étude

L'objectif global de notre travail consiste à évaluer les performances épuratoires de la filière à 3 bassins de lagunage à microphytes du 2iE.

Les objectifs spécifiques liés à cette étude consistent à :

- Tester en parallèle les deux modes d'échantillonnage par des prélèvements hebdomadaires sur les 3 bassins de la filière 1 de lagunage à microphytes de 2iE.
- Faire une étude comparative de l'évaluation des résultats par l'analyse des variances en utilisant le logiciel XLSTAT.
- Proposer et justifier la méthode de choix.

3. Présentation du site

L'étude a été réalisée à la station pilote expérimentale du 2iE à Ouagadougou. Le fonctionnement de cette station est régi par le climat soudano-sahélien de Ouagadougou marqué par une longue période sèche d'octobre à mai avec un ensoleillement important en durée [2500 heures d'ensoleillement par an] et en intensité [19.5 – 22.7 MJ/m²/j] et des pertes en eau par évaporation variant de 8 mm/j en moyenne [Maiga et al, 2006]. En 2003, cette station a été réaménagée avec, notamment, la construction d'un bassin anaérobie et la réorganisation des filières de traitement. La station de lagunage du 2iE est ainsi composée de cinq filières :

- Filière n°1 : composée d'un bassin anaérobie, un bassin facultatif et un bassin de maturation, en série.
- Filière n°2 : composée d'un décanteur primaire, un bassin facultatif et un bassin de maturation.
- Filière n°3 : comprend un décanteur primaire, un lit bactérien rectangulaire, un décanteur secondaire et un bassin de maturation.
- Filière n°4 : un décanteur primaire, un lit bactérien circulaire, un décanteur secondaire et un bassin de maturation.
- Filière n°5 : un décanteur primaire, des bassins à macrophytes de *Pistia stratiotes*.

La situation géographique du site (Figure 1) ainsi que le schéma général de la filière 1, qui a fait l'objet de cette étude (Figure 2) sont présentées ci-après :

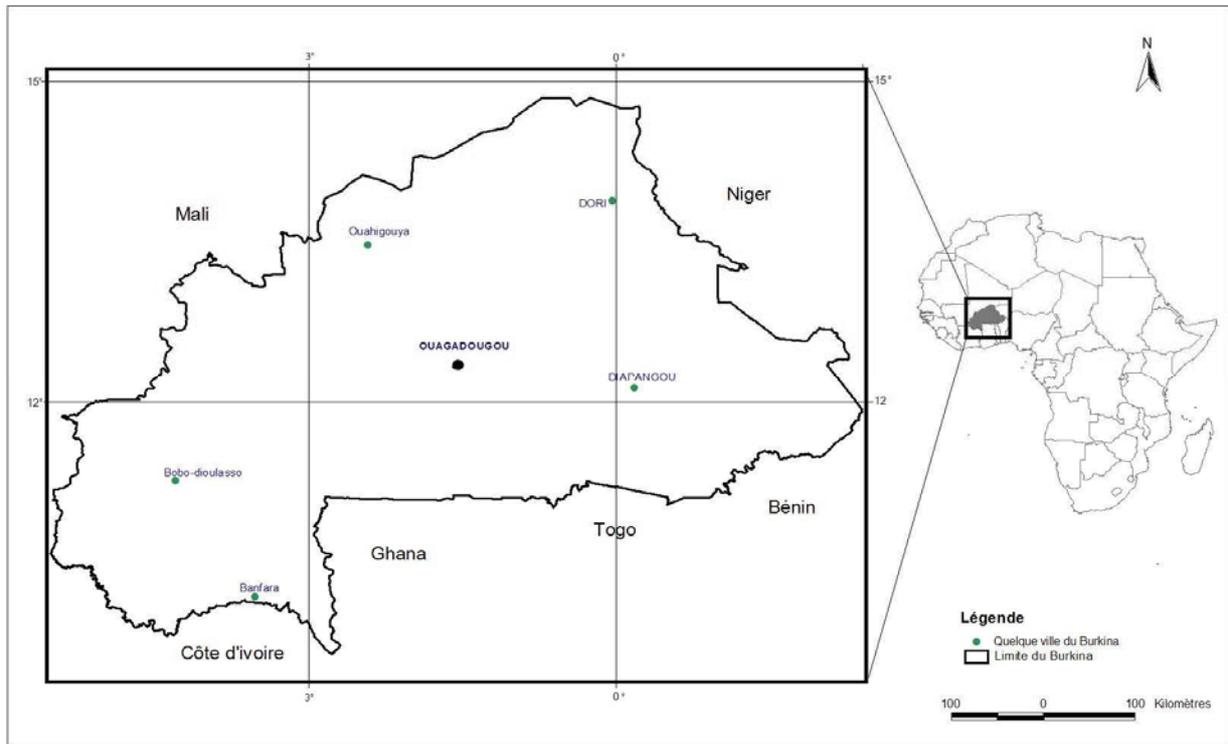


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude (source Maiga et al, 2006)

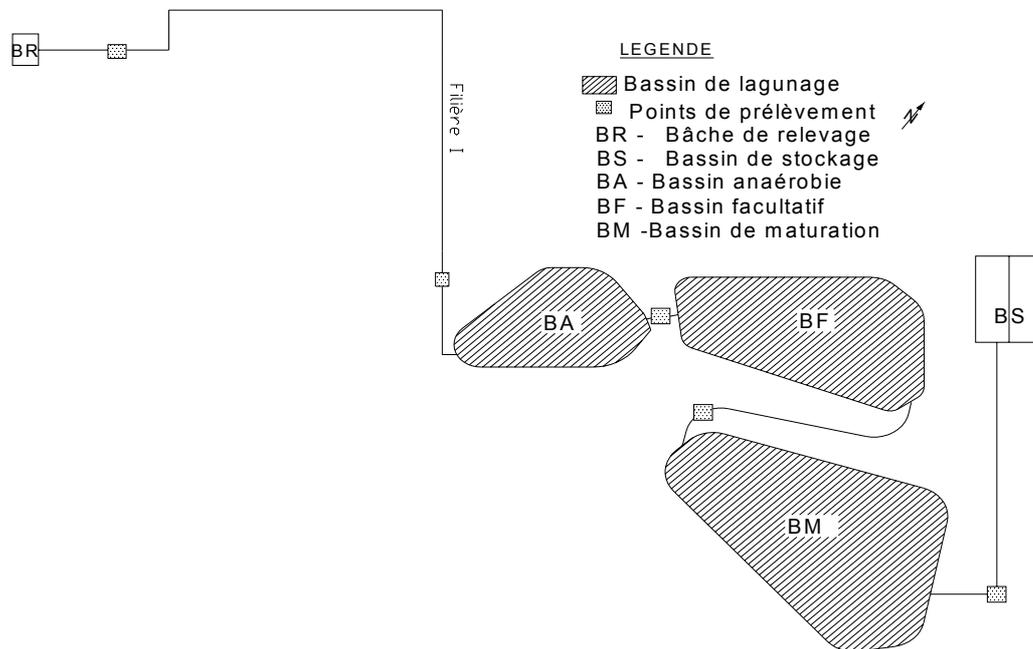


Figure. Schéma général de la filière I de lagunage à microphyte de la station expérimentale pilote d'épuration des eaux usées de 2iE

CHAPITRE 2 : L'ÉCHANTILLONNAGE DANS L'ÉTUDE DES PERFORMANCES ÉPURATOIRES DU LAGUNAGE

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la revue bibliographique des principaux concepts soulevés par l'étude. Trois concepts seront évoqués dans cette partie ; à savoir le lagunage à microphytes, l'étude des performances épuratoires d'une filière de lagunage et surtout la problématique de l'échantillonnage.

2. Généralités sur le lagunage à microphytes

Le lagunage naturel à microphytes est un procédé d'épuration qui consiste à envoyer les eaux usées dans plusieurs bassins en cascade, généralement trois. Le processus d'autoépuration qui s'établit dans les bassins, est dû en grande partie à des organismes vivants (algues, bactéries...) qui prolifèrent et trouvent leur équilibre en fonction des conditions du milieu. Dans le premier bassin s'opère la décantation des matières en suspension et la dégradation d'une partie des matières solubles, sous l'effet de micro-organismes anaérobies. Dans les deux autres bassins s'achève la finition de l'épuration en particulier l'abatement de la charge en azote et phosphates et l'élimination de la pollution bactérienne.

Le premier bassin (de décantation) est le plus profond, et le volume global de l'ensemble doit être très important : soit de 60 à 80 fois plus que la quantité d'effluent reçu, ce qui permet une dilution considérable et d'assurer, le cas échéant, de fortes variations de charge à assainir.

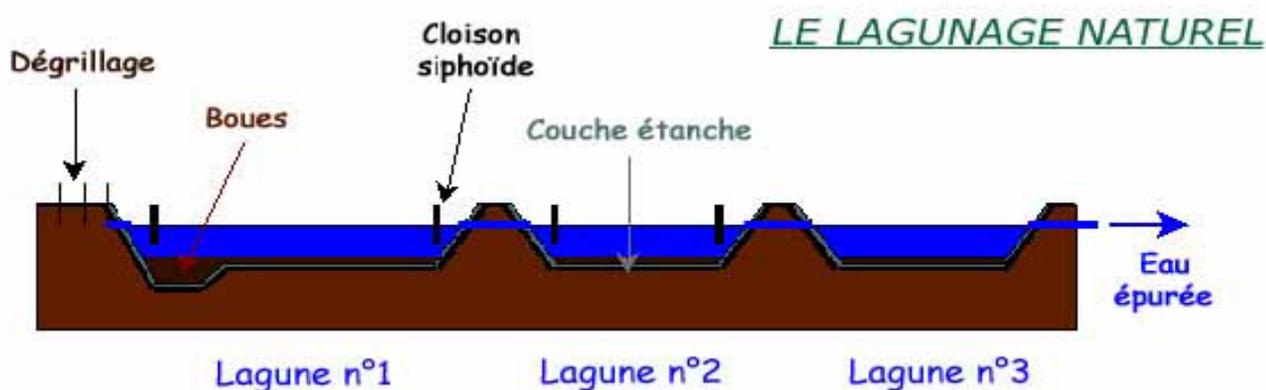


Figure 3 : Schéma d'un système classique de lagunage à microphytes.

Source : (www.univ-lehavre.fr/cybernat/pages/lagunatu)

Lagune n°1 : Bassin anaérobie

Lagune n°2 : Bassin facultatif

Lagune n°3 : Bassin de maturation

3. Intérêt de l'étude des performances épuratoires

L'étude des performances épuratoires d'une filière de lagunage répond généralement à trois objectifs principaux :

- a) contrôle de la qualité, à usage interne, en vue de décider des processus de correction nécessaires à court terme ;
- b) Caractérisation de la qualité destinée à indiquer la qualité, par exemple comme élément d'un programme de recherche, pour un contrôle ou pour la mise en évidence de variations de qualité à long terme ;
- c) Identification des sources de pollution.

Dans notre cas, l'étude des performances épuratoires vise les deux premiers objectifs puisque non seulement l'étude s'inscrit dans un programme de recherche mais aussi parce que les eaux issues de la filière de traitement sont destinées à l'irrigation. Il s'agit donc d'une auto surveillance, qui permet de suivre l'ensemble des paramètres de pollution pour évaluer l'efficacité du système.

Ainsi, Klutsé (1995) étudiant les performances d'une série de deux bassins (BF + BM) a obtenu les rendements suivants : rendement de 70% pour l'élimination de la DBO₅ et l'élimination de 3 et 2 ulog respectivement de coliformes thermotolérants et de streptocoques fécaux [Klutsé, 1995]. Des travaux récents ont évalué les performances d'une série de 3 bassins (BA + BF + BM) constituant la filière 1 de lagunage à microphytes. Les rendements épuratoires moyens obtenus sont de 66% pour les MES, 81% en DCO et 87% en DBO₅ [Maiga *et al*, 2006].

4. Généralités sur l'échantillonnage

4.1 Définitions

Toutes les définitions suivantes sont tirées du recueil de normes françaises relatives à la « Qualité de l'eau » publié par AFNOR en 1997.

- **Echantillonnage** : c'est l'action qui consiste à prélever une partie considérée comme représentative d'une masse d'eau en vue de l'examen de diverses caractéristiques définies.
- **Echantillon** : c'est la partie idéalement représentative prélevée dans une masse d'eau définie, de façon intermittente ou continue afin d'en examiner diverses caractéristiques définies.
- **Echantillonneur** : c'est l'appareillage utilisé pour prélever un échantillon d'eau, de façon intermittente ou continue, en vue de l'examen de diverses caractéristiques définies.

4.2 Différents types d'échantillons

4.2.1 Echantillons ponctuels

Les échantillons ponctuels sont des échantillons discrets généralement prélevés de façon manuelle, mais pouvant être prélevés automatiquement à la surface des eaux, à des profondeurs données et au fond. Normalement, chaque échantillon ponctuel est représentatif de la qualité de l'eau à l'instant et à l'endroit du prélèvement [ISO 5667-2 :1991]. Le prélèvement d'échantillons ponctuels est recommandé si le débit de l'eau à échantillonner n'est pas uniforme, si les valeurs des paramètres à analyser ne sont pas constantes et si l'utilisation d'un échantillon composite risque, en raison des interactions, de masquer les différences entre les échantillons composants. C'est le cas, notamment des paramètres bactériologiques qui sont sujet à des variations notables au cours de la journée. De ce fait, il est préconisé d'effectuer des prélèvements d'échantillons ponctuels pour l'analyse des paramètres bactériologiques tels que les coliformes fécaux [Pearson *et al.* 1987]. Il convient également d'étudier les échantillons ponctuels pour rechercher l'existence éventuelle d'une pollution, surveiller son existence ou, dans le cas du prélèvement automatique d'échantillons discrets, déterminer l'heure de la journée à laquelle les polluants sont présents. L'étude d'échantillons ponctuels est indispensable lorsque l'objectif d'un programme d'échantillonnage est d'estimer si la qualité des eaux est compatible avec des limites fixées non relatives à la qualité moyenne ; le prélèvement d'échantillons ponctuels est recommandé pour la détermination de paramètres instables tels que la teneur en gaz dissous, en chlore résiduel, en sulfures solubles [ISO 5667-2 :1991].

4.2.2 Echantillons prélevés de façon discontinue

a) échantillons prélevés sur un intervalle de temps fixe

Ces échantillons sont prélevés à l'aide d'un mécanisme chronométrique chargé de démarrer et d'arrêter le prélèvement d'eau dans un intervalle de temps déterminé. Un procédé usuel consiste à pomper l'échantillon pendant une durée fixée dans un ou plusieurs récipients, chaque récipient recevant un volume déterminé. Le paramètre étudié peut conditionner la durée de l'intervalle de temps.

b) échantillons prélevés à volume écoulé fixe

Ces échantillons sont prélevés lorsque les variations des critères de qualité de l'eau et du débit de l'effluent sont indépendantes. Pour chaque unité de volume écoulé, un échantillon contrôlé est prélevé sans tenir compte du temps.

c) échantillons prélevés à intervalle de temps fixes

Ces échantillons sont prélevés lorsque les variations des critères de qualité de l'eau et du débit de l'effluent sont indépendantes. A intervalles de temps constants, des échantillons de volume variable sont prélevés, le volume étant fonction du débit.

4.2.3 Echantillons prélevés en continu

a) échantillons prélevés en continu sous débit constant

Les échantillons prélevés par cette méthode contiennent tous les constituants présents pendant une durée d'échantillonnage donnée, mais, dans de nombreux cas, ne fournissent pas d'indication sur les variations de concentration des paramètres spécifiques pendant cette durée.

b) échantillons prélevés en continu sous débit variable

Les échantillons proportionnels au débit sont représentatifs de la qualité globale de l'eau. Lorsque le débit et la composition varient simultanément, un échantillon proportionnel au débit permet de détecter les variations qui ne sont pas observables au moyen d'échantillons ponctuels, à condition que les échantillons restent discrets et que les prélèvements soient en nombre suffisant pour permettre de différencier les modifications de composition. Cette méthode de prélèvement est par conséquent la plus précise en eau courante lorsque le débit et la concentration des polluants à analyser varient simultanément de façon significative.

4.2.4 Echantillons composites

Les échantillons composites peuvent être prélevés manuellement ou automatiquement, quel que soit le type d'échantillonnage considéré (dépendant du débit, du temps, du volume ou de l'emplacement). Des échantillons prélevés en continu peuvent être additionnés pour obtenir des échantillons composites. Les échantillons composites fournissent des données sur une composition moyenne. Il convient par conséquent, avant de combiner les échantillons, de vérifier que ces données sont bien celles que l'on souhaite obtenir, ou que le(s) paramètre(s) à étudier ne varient pas de façon significative pendant la durée du prélèvement. Le prélèvement d'échantillons composites est intéressant lorsque la valeur limite fixée est relative à la qualité moyenne de l'eau [ISO 5667-2 :1991]. Ces échantillons permettent donc de caractériser la composition moyenne des eaux qui entrent et/ou qui sortent des différents bassins d'une filière de lagunage. Les échantillons composites fournissent la meilleure estimation de la composition moyenne pour une période de temps donnée, à la condition que ce qui doit être déterminé soit stable entre le moment du prélèvement et celui de l'analyse [ISO 5667/1-1980].

4.2.5 Echantillons de grand volume

Certaines méthodes d'analyse de certains paramètres nécessitent le prélèvement d'échantillons de volume important, allant de 50 litres à plusieurs mètres cubes. Tel est le cas, par exemple, pour les analyses portant sur les pesticides et certains microorganismes dont la culture est impossible. On peut prélever l'échantillon par des méthodes classiques, en veillant bien à assurer la propreté du récipient ou du réservoir destiné à le recevoir, ou en faisant passer un volume que l'on mesure à travers une cartouche d'absorption ou un filtre, selon le paramètre considéré.

4.3 Matériels d'échantillonnage

4.3.1 Généralités

La concentration des constituants chimiques (paramètres) dont l'analyse permet d'évaluer la qualité de l'eau est variable et peut aller en quantités inférieures au microgramme, ou traces, à des quantités importantes. Les problèmes les plus fréquemment posés par les échantillonneurs et récipients pour échantillons sont l'adsorption par les parois, la contamination avant échantillonnage en raison d'un nettoyage inadéquat, et la contamination de l'échantillon par le matériau constituant. Il convient également de choisir les matériels adaptés aux caractéristiques des liquides prélevés et aux types d'analyses que l'on veut effectuer.

4.3.2 Matériels d'échantillonnage pour analyses physico-chimiques

Il convient de prélever un volume d'échantillon suffisant pour les analyses spécifiées. Les échantillons de trop faible volume risquent de ne pas être représentatifs. Par ailleurs, il faut utiliser des matériaux n'induisant pas de contamination et ayant une conception simple permettant un nettoyage aisé. L'échantillonneur ne doit pas induire d'erreurs significatives.

a) matériel pour échantillonnage ponctuel

Les échantillons ponctuels sont généralement prélevés manuellement. L'équipement le plus simple pour prélever des échantillons de surface est constitué d'un godet ou d'un flacon à large col, plongé dans la masse d'eau, puis halé une fois rempli.

b) matériel d'échantillonnage automatique

Un échantillonnage automatique équivaut à une série de prises ponctuelles effectuées avec une périodicité de temps ou de débit prédéfinie. L'échantillonnage automatique est fréquemment utilisé pour l'évaluation des performances du lagunage par les laboratoires disposant de suffisamment de moyens financiers. Des échantillonneurs instrumentaux et souvent hautement automatisés ont été mis au point par divers fabricants. Il existe principalement deux types d'échantillonneurs automatiques : ceux dépendants du temps et ceux dépendants du volume. Les échantillonneurs dépendants du temps prélèvent des

échantillons discrets, composites ou continus sans tenir compte des variations de débit, tandis que les échantillonneurs dépendants du volume effectuent les mêmes prélèvements en tenant compte des variations de débit.

La figure ci-après présente un dispositif d'échantillonnage automatique. Ce dispositif peut être stationné sur un bassin de lagunage pour prélever des échantillons ponctuels formant un échantillon composite. La fréquence de prélèvement est réglable selon le degré de précision recherché.



Figure 4 : Dispositif d'échantillonnage automatique stationnaire Source : <http://www.wtw.com>

4.3.3 Matériels d'échantillonnage pour analyses microbiologiques

Pour la plupart des échantillons, des flacons stérilisés en verre ou en plastique conviennent. Pour les prélèvements en eau profonde, par exemple dans des lacs ou des réservoirs, il existe divers dispositifs d'échantillonnage en profondeur (cylindre en verre ou en plastique, flacons immergeables). L'ensemble de l'appareillage utilisé, y compris les pompes et les dispositifs de pompage, doit être décontaminé et l'appareillage ne doit pas introduire par lui-même de nouveaux microorganismes.

4.4 Transport et conservation des échantillons

Il est évident que les récipients contenant les échantillons doivent être protégés et bouchés de sorte qu'ils ne se détériorent pas et qu'ils ne perdent aucune partie de leur contenu durant le transport. Il convient que l'emballage protège les récipients des contaminations extérieures possibles, notamment au voisinage de l'ouverture, et ne soit pas lui-même une source de contamination.

Des échantillons doivent être correctement préservés après collection (APHA, 1985). Habituellement le stockage en dessous de 4°C pour un maximum de 30 h est proportionné, bien que, pour certains paramètres l'analyse doit être faite plus tôt (par exemple, à moins de 6 heures pour les coliformes fécaux) [Pearson *et al.* 1987 ; ISO 5667-3 :1994].

L'utilisation à cet effet d'armoires réfrigérées ou de locaux frais et obscurs est très recommandée.

Toutes les eaux, en particulier les eaux superficielles et surtout les eaux résiduaires, sont susceptibles de se modifier plus ou moins rapidement par suite des réactions physiques, chimiques ou biologiques qui peuvent avoir lieu entre l'instant de prélèvement et l'analyse.

Si les précautions nécessaires ne sont pas prises avant et pendant les transports ainsi que pendant le temps durant lequel les échantillons sont conservés au laboratoire avant d'être analysés, les concentrations déterminées seront très différentes de ce qu'elles étaient au moment du prélèvement [ISO 5667-2 :1991].

5. La problématique de l'échantillonnage dans la qualité des résultats

Les échantillons sont prélevés dans le but de déterminer les paramètres de caractérisation physico-chimique, organique et biologique. Dans une étude comparative, la pertinence des résultats dépend en premier lieu de la qualité et de la méthodologie d'échantillonnage. En effet, les échantillons prélevés doivent être aussi représentatifs que possible de l'ensemble qui doit être caractérisé.

Il a été montré que l'échantillonnage et l'analyse introduisent tous deux des erreurs et le plus souvent, la première est très supérieure à la seconde. En effet, si on considère un nombre quelconque n_e d'échantillons et n_a analyses effectuées sur chaque échantillon, l'erreur totale qui en résulte est donnée par la formule (Edeline, 1985) :

$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma_e^2}{n_e} + \frac{\sigma_a^2}{n_e * n_a}$$

Où σ_a , σ_e sont respectivement les erreurs dues à l'analyse et à l'échantillonnage.

Cette formule indique qu'en augmentant le nombre n_a d'analyses, la réduction de l'erreur totale atteint une valeur limite, car seul le second terme diminue. Ce qui indique qu'il est inutile de choisir des méthodes analytiques fort précises si l'échantillonnage introduit une erreur inchangée dix fois supérieure (Edeline, 1985). Les préceptes suivants sont donc proposés en règle générale en technique sanitaire (Edeline, 1985) :

- Il est plus utile de faire un seul dosage sur deux échantillons qu'un dosage en double sur un échantillon.
- Il est plus utile de faire un seul dosage sur deux échantillons qu'un dosage en double sur un échantillon ;

- Il est plus utile de faire un seul dosage sur trois échantillons qu'un dosage en double sur deux échantillons ;
- Il est plus utile de faire un seul dosage sur quatre échantillons qu'un dosage en double sur trois échantillons.

Le prélèvement d'échantillons joue un rôle important en matière de comparabilité, de respect des contraintes légales et de garantie des intérêts d'exploitation. Il constitue la base d'un processus de contrôle permanent des objectifs et critères de qualité, en particulier dans l'estimation des performances de stations d'épuration des eaux usées. Le prélèvement d'échantillons représente la première d'une suite d'opérations dans la recherche et l'analyse de paramètres chimiques, physiques et biologiques. Il influe donc d'une manière décisive et définitive sur les informations obtenues par l'analyse. L'importance de l'échantillonnage dans la qualité des résultats a été bien soulignée par Mara et Pearson (1987) qui signalent que certaines méthodes d'évaluations des performances de bassins ont été basées sur des méthodes de prélèvement incorrectes ou douteuses, par conséquent, elles ne sont pratiquement d'aucune utilité.

Ainsi, utiliser des échantillons représentatifs est d'une importance primordiale. Car ce n'est qu'à partir de tels échantillons qu'on procédera à l'estimation fiable et sûre de la qualité des effluents d'un bassin de lagunage.

Une autre influence essentielle sur le résultat obtenu est exercée par les facteurs directement liés au prélèvement d'échantillons : mode de prélèvement, lieu de prélèvement, stockage, transport et conservation des échantillons ainsi que la méthode d'analyse elle-même.

Ainsi, pour l'évaluation minimale de la qualité des effluents, les directives recommandent que les échantillons composites de 24 heures soient obtenus par l'une des manières suivantes :

- par un échantillonneur automatique qui prend à chaque heure des échantillons ponctuels,
- par la prise d'échantillons manuellement chaque 1, 2 ou tout au plus 3 h (selon la disponibilité de travail). Si ni l'une ni l'autre de ces options n'est faisable alors les échantillons devraient être pris toutes les 2 ou 3 heures pour aussi longtemps que possible pendant la journée [Pearson *et al.* 1987].

L'importance du prélèvement d'échantillons est encore soulignée par le grand nombre de contraintes légales et de conditions normatives édictées par les organismes tels que ISO, AFNOR et les institutions nationales en charge de la gestion de l'environnement.

6. Fréquence d'échantillonnage

La fréquence de prélèvement dépend de l'objectif visé à travers l'étude que l'on veut faire. Des échantillons devraient être prélevés à différentes saisons à des fréquences qui permettent de tenir compte de la variabilité saisonnière. Ainsi, selon les régions climatiques et en fonction des saisons, on peut avoir 3 à 4 campagnes d'échantillonnages : saison sèche, saison chaude, saison pluvieuse et saison froide [Soares *et al.* 1996]. Pour le suivi d'une station d'épuration, [Pearson *et al.* 1987] recommandent une fréquence d'échantillonnage hebdomadaire. Dans ce cas, ils préconisent des échantillonnages rotatifs journaliers pendant une période de cinq semaines au milieu de chaque saison d'échantillonnage.

7. Conclusion

Cette revue bibliographique nous a permis de consolider nos connaissances sur le lagunage à microphytes en particulier. C'est une technologie de traitement des eaux usées domestiques et industrielles qui présente beaucoup d'avantages surtout pour les pays africains du point de vue économique et climatique. Nous retenons aussi qu'il est très important d'étudier les performances épuratoires d'une filière de lagunage afin de caractériser la qualité des effluents issus du traitement. Cela permet de savoir si cet effluent est apte ou non à être rejeté dans la nature ou à être réutilisé notamment en agriculture. Le rôle de l'échantillonnage dans la qualité des résultats a également été mis en exergue par de nombreux auteurs.

CHAPITRE 3 : MATERIELS ET MÉTHODES

1. Introduction

Dans cette partie, nous présentons la méthodologie que nous comptons utiliser pour résoudre le problème qui nous a été posé dans le premier chapitre. Nous détaillons les matériels et les méthodes spécifiques que nous avons utilisé pour les prélèvements d'échantillons et les analyses au laboratoire.

2. Approche méthodologique

Cette étude s'est déroulée en trois phases :

- une phase préliminaire
- une phase de terrain
- une phase de traitement et d'analyse des données.

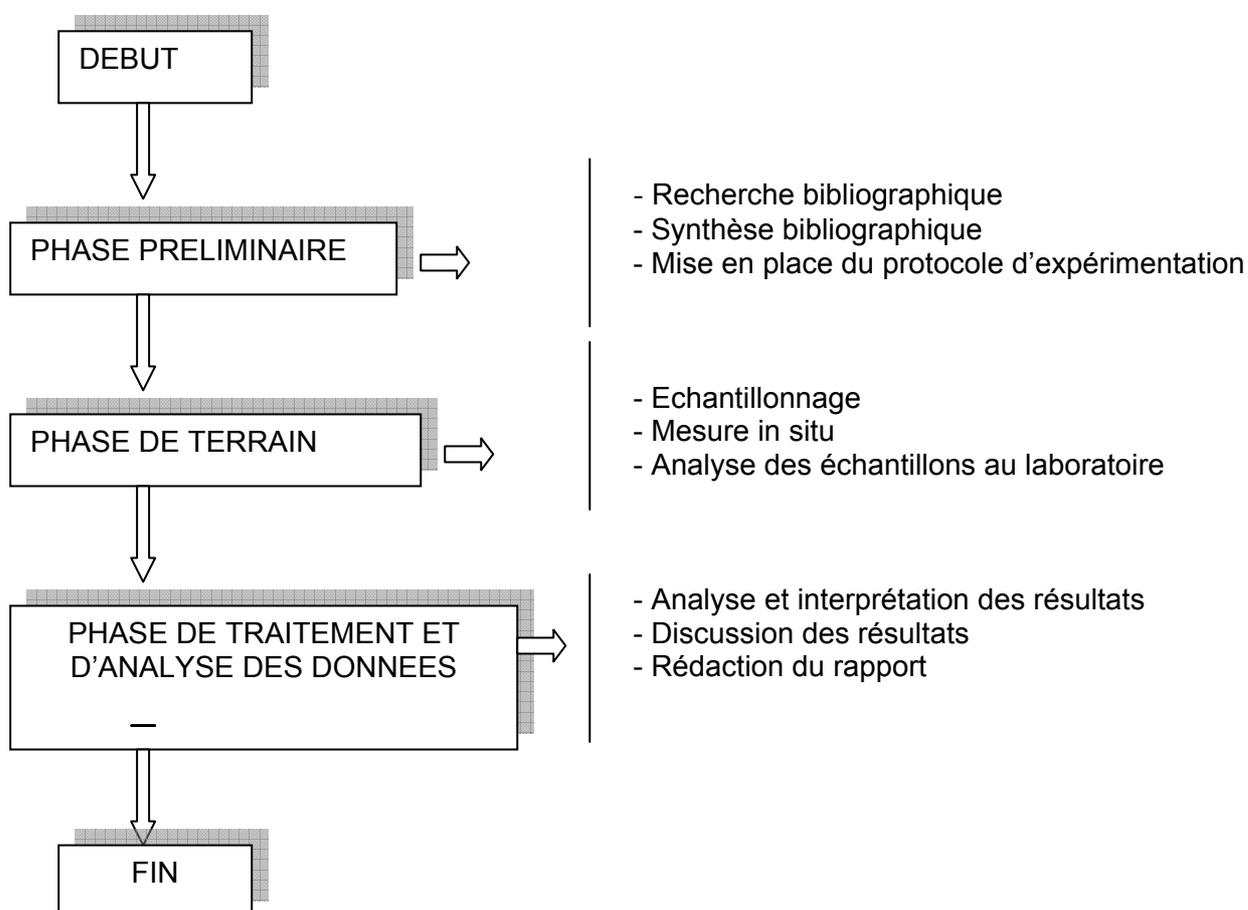


Figure 5 : Schéma de la méthodologie de travail.

• Phase préliminaire

Cette phase à consister à faire une recherche bibliographique à la bibliothèque du 2iE et sur internet. Au cours de cette étape, nous avons pu recenser les différentes méthodes d'échantillonnage généralement utilisées pour l'étude des performances épuratoires du

lagunage et aussi de comprendre l'importance de l'étude de ces performances. Nous avons ainsi pu rédiger la partie théorique portant sur l'échantillonnage et les performances épuratoires. Les documents utilisés sont, pour la plupart, des travaux de diplôme et de recherche ou des thèses de doctorat portant sur les systèmes de traitement des eaux usées en général et sur la station d'épuration du 2iE en particulier. Nous avons consulté aussi des sites Internet portant sur l'eau en général.

- **Planification des taches sur le terrain**

Nous avons fixé la fréquence des travaux sur le terrain ainsi que les différents paramètres à mesurer et les outils nécessaires pour le faire.

- **Phase de terrain**

Durant cette étape, le travail a consisté à faire des prélèvements à la station expérimentale de traitement des eaux usées et à effectuer des analyses au laboratoire du 2iE.

- **Les prélèvements d'échantillons**

Ils ont été effectués en utilisant deux méthodes différentes. La première a consisté à faire des prélèvements d'échantillons ponctuels des effluents de chacun des trois bassins de la filière toutes les deux heures pendant 24 heures. Tous les échantillons ponctuels sont mélangés afin d'obtenir un échantillon composite. Nous avons utilisé des flacons en polyéthylène, transparents, de capacité 1 litre. La seconde méthode a consisté à faire des prélèvements à l'aide du dispositif du « *water column sampler* » à trois périodes différentes (10 h, 16 h et 22h). Les prélèvements étaient réalisés une fois par semaine au niveau du siphon situé près de la sortie du bassin. Les mesures des paramètres physico-chimiques que sont la température, le pH, l'oxygène dissous et la conductivité s'effectuaient directement pendant les prélèvements.

- **Analyses au laboratoire**

Après les prélèvements, les échantillons sont transportés au laboratoire afin d'effectuer les analyses des paramètres de pollution organique (DCO, DBO₅, MES) et des nutriments (azote et phosphore).

- **Phase de traitement et d'analyse des données**

Il s'agit de l'étape de dépouillement, d'organisation des données recueillies. Cette phase s'est soldée par l'analyse, puis l'interprétation et la rédaction finale du présent document. Les résultats obtenus ont été exploités au mieux afin d'atteindre les objectifs fixés par l'étude. A l'issu de ce traitement nous avons pu :

- étudier les rendements épuratoires des bassins et de toute la filière de lagunage.
- Comparer les deux modes d'échantillonnage par l'analyse des variances.

3. Paramètres analysés

La demande biologique en oxygène (DBO₅), la demande chimique d'oxygène (DCO) et les matières en suspension (MES) sont les paramètres utilisés pour mesurer la pollution organique. Mais d'autres, comme les nutriments, ont aussi leur importance. Ainsi, en plus des paramètres de pollution organique cités précédemment, l'azote sous forme d'azote ammoniacal et de nitrates ainsi que le phosphore sous forme d'orthophosphates ont été analysés au laboratoire.

3.1 Demande Biologique en Oxygène

La DBO, ou Demande Biologique en Oxygène correspond à la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies de l'eau pour oxyder les matières organiques, dissoutes ou en suspension dans l'eau. Il s'agit donc d'une consommation potentielle d'oxygène par voie biologique. Ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en matières organiques biodégradables d'une eau. En effet, toute matière organique biodégradable polluante entraîne une consommation d'oxygène au cours des procédés d'autoépuration (oxydation des matières organiques biodégradables par des bactéries). La DBO est en général calculée au bout de 5 jours à 20°C et dans l'obscurité. On parle alors de DBO₅. Elle est exprimée en mg/litre d'oxygène.

3.2 Demande Chimique en Oxygène

La Demande Chimique en Oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation par voie chimique de la totalité des matières oxydables présentes dans une eau. Ces matières oxydables sont composées de substances organiques (biodégradables ou non) et minérales. L'oxydant employé classiquement est le dichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) et la réaction se fait à chaud à 150°C. Elle est exprimée en mg/litre d'oxygène.

3.3 Matières en suspension

Les matières en suspension (MES) désignent l'ensemble des particules minérales et/ou organiques insolubles présentes dans une eau naturelle ou polluée. Ces particules contribuent à la turbidité de l'eau. Leur effet néfaste est mécanique, par formation de sédiments et d'un écran empêchant la bonne pénétration de la lumière (réduction de la photosynthèse). Leur effet néfaste est par ailleurs chimique par constitution d'une réserve de pollution potentielle dans les sédiments. La teneur en MES s'exprime en mg/l.

3.4 Azote ammoniacal

L'azote organique se transforme dans les eaux usées en azote ammoniacal (N-NH_4^+). L'azote ammoniacal provient de la décomposition, par des bactéries, de l'azote organique. L'azote ammoniacal est présent dans les eaux sous forme d'ammoniac (NH_3) et d'ammonium (NH_4^+). L'azote ammoniacal est une forme instable puisqu'il subit une nitrification au cours de laquelle il est oxydé sous forme de nitrates par des bactéries spécifiques. C'est un indicateur d'efficacité du traitement de l'eau. La teneur en azote ammoniacal s'exprime en mg/l d'azote.

3.5 Nitrates

Les nitrates (N-NO_3) sont une forme très stable de l'azote dont la présence dans l'eau peut présenter une double gêne ; d'une part pour les mêmes raisons que les nitrites et d'autre part car ils constituent un agent fertilisant susceptible de favoriser le développement excessif d'algues dans le milieu récepteur (phénomène d'eutrophisation). Dans le cycle de l'azote, les nitrates, sous l'action de bactéries « dénitrifiantes », sont transformés en azote gazeux. Ce gaz s'échappe alors dans l'atmosphère. Ce phénomène est appelé dénitrification. La teneur en nitrates s'exprime également en mg/l d'azote (N).

3.6 Orthophosphates

Le phosphore est éliminé des eaux usées sous forme d'orthophosphate (P-PO_4^{3-}) et mesuré sous forme de PO_4^{3-} dissous. L'orthophosphate représente le composant principal du phosphore total sous forme dissoute et non dissoute dans une eau. Sa teneur dans une eau s'exprime en mg/l.

4. Données hydrauliques

4.1 Caractéristiques hydrauliques des ouvrages

La STEP reçoit les eaux usées domestiques en provenance des locaux du 2iE (dortoirs, bureaux, cuisine, toilettes). Toutes les eaux qui arrivent dans la station, passent au préalable par une bache de pompage de $3,5 \text{ m}^3$ de volume comportant un dégrilleur placé à l'entrée et incliné d'un angle de 60° . Ce dégrilleur constitue le premier niveau de traitement (prétraitement) où l'influent brut est débarrassé de ses éléments grossiers.

La bache de pompage est équipée de deux pompes centrifuges identiques immergées, fonctionnant alternativement avec un débit de $6,4 \text{ m}^3/\text{h}$ qui refoulent les eaux prétraitées vers la station, où elles peuvent être réparties dans cinq filières distinctes.

Dans le cadre de notre étude, nous ne nous sommes intéressés qu'à la filière I qui est la filière de lagunage à microphytes. Elle est composée de 3 bassins en série qui reçoivent les eaux usées provenant de la bache de pompage.

- **Le bassin anaérobie :**

Il est de forme cylindro-conique avec des talus à forte pente. Il est construit avec de la latérite stabilisée par du ciment. Ce bassin est utilisé pour recevoir des eaux usées très chargées en matières organiques et contenant de grandes quantités de matières en suspension. Comme son nom l'indique, c'est un bassin dépourvu d'oxygène dissout (quantité très faible) et qui ne contient pratiquement pas d'algues.

- **Le bassin facultatif :**

Il a une forme ovale avec des talus à pente assez faible. Il reçoit les eaux provenant du bassin anaérobie et il contient de grandes quantités d'algues. Il est conçu pour éliminer, en grande partie, la pollution carbonée.

- **Le bassin de maturation :**

C'est un bassin de forme ovale avec aussi des talus à faible pente. Son rôle principal est d'éliminer la pollution bactérienne et parasitaire. Il reçoit les eaux provenant directement du bassin facultatif et il contient également beaucoup d'algues.

Les caractéristiques géométriques des 3 bassins sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Caractéristiques des différents bassins de la filière I (Source : GEDU, 2004)

Type de bassin	Profondeur (m)	Surface moy. (m ²)	Volume moy. (m ³)	Temps de séjour (jours)
Bassin Anaérobie	2,6	70	181	3
Bassin Facultatif	1,4	415	581	9,5
Bassin de Maturation	0,9	337	303	5,5

4.2 Evaluation de l'équivalent-habitants (EH)

En termes simples, il s'agit d'une estimation de la quantité de pollution rejetée par un usager domestique. L'équivalent-habitant est en fait principalement utilisé en matière de traitement d'eaux usées urbaines. Dans notre cas, nous considérons que chaque étudiant constitue un équivalent-habitant (1 EH) et chaque enseignant ou personnel salarié constitue un ½ équivalent-habitant (0,5 EH). Nous avons choisi ce ratio parce que les étudiants sont des habitants permanents alors que le personnel salarié n'est généralement présent sur le site que pendant les heures de travail.

La population totale est répartie comme suit :

Tableau 2 : Nombre d'équivalent-habitant de la station évalué à partir des données de la DESA, 2007

	Nombre de personnes	Ratio en EH	Total
Elèves	135	1	135
Personnel	210	0,5	105
Nombre EH de la station			240

4.3 Estimation de la charge organique en DBO₅

Le volume d'eau qui arrive à la station a été estimé à partir des relevés journaliers des compteurs reliés aux pompes. Ce sont des pompes immergées du type *Flygt* dont le débit est estimé à 6,4 m³/h. Durant la période d'échantillonnage qui a duré de mars à mai 2007, la quantité moyenne d'eau rejetée par l'ensemble des habitants est estimée à 55 m³ /j. La charge organique volumique moyenne sera évaluée sur le bassin anaérobie qui a un volume de 181 m³. Les valeurs de DBO₅ de l'eau brute varient entre 140 mg/l et 300 mg/l. Les charges organiques volumiques admises dans le bassin anaérobie sont alors comprises entre 42 g DBO₅/m³/j et 91 g DBO₅/m³/j. Ces charges organiques volumiques moyennes apportées par les eaux brutes sont légèrement en dessous des données de littérature avec un taux de variation de 9%. En effet, les données de la littérature rapportent des charges admissibles de 100 à 350 g DBO₅/m³/j sur un bassin anaérobie [Arthur, 1983].

5. Modes d'échantillonnage utilisés

Au cours de cette étude, nous avons utilisé deux modes d'échantillonnage : l'échantillonnage composite de 24 heures et l'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* ».

5.1 Echantillonnage composite

5.1.1 Points de prélèvement d'échantillons composites

L'échantillonnage composite a consisté à faire des prélèvements d'échantillons à l'entrée et à la sortie des 3 bassins de la filière. Il faut préciser que, pour deux bassins en série, la sortie du 1^{er} bassin correspond à l'entrée du second. Ainsi, nous avons 4 points de prélèvements pour les trois bassins. Les points de prélèvement sont des regards de visite de forme rectangulaire équipés d'un déversoir triangulaire sauf pour l'eau brute qui débouche en gueule bée dans le bassin anaérobie à travers un tuyau PVC de diamètre 100 mm. La profondeur des regards est de 50 cm.

5.1.2 Fréquence des prélèvements d'échantillons composites

Les prélèvements ont été effectués à une fréquence hebdomadaire pendant les cinq premières semaines puis à une fréquence bihebdomadaire pendant les deux dernières semaines. La période d'échantillonnage a duré du 23 mars au 18 mai 2007. Les prélèvements se font manuellement et de façon discontinue pendant 24 heures à intervalle de temps fixe. Le pas de temps fixé est de 2 heures. Il s'agit donc de prélever manuellement des échantillons ponctuels toutes les 2 heures pendant 24 heures. Le pas de temps de 2 heures est justifié puisque le pas de temps préconisé pour les prélèvements d'échantillons composites dans l'évaluation des performances épuratoires est de 1 à 3 heures [Pearson *et al.*, 1987].

5.1.3 Matériels de prélèvement d'échantillons composites

Les matériels de prélèvement sont composés de flacons en polyéthylène, à couvercle, transparents de capacité 1 litre. Ce matériel est parfaitement adapté à la prise d'échantillons ponctuels tel que préconisé par les normes ISO [ISO 5667-2 :1991]. Nous avons utilisé un seau en plastique pour le transport des échantillons au laboratoire.

5.1.4 Conservation des échantillons

Les échantillons ont été conservés au frais dans un réfrigérateur réglé, à 4°C comme préconisés par l'ISO [ISO 5667-3 :1994]. Cette température permet d'éviter la minéralisation des composés présents dans les échantillons et donc d'assurer une meilleure qualité des résultats d'analyses. Les analyses se font immédiatement à la fin de tous les prélèvements.

5.2 Echantillonnage de colonne

5.2.1 Points de prélèvement des échantillons de colonne

L'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* » a consisté à faire des prélèvements d'échantillons seulement à la sortie de deux bassins de la filière (bassin anaérobie et bassin de maturation). Nous n'avons pas pu faire les prélèvements à la sortie du bassin facultatif pour des raisons d'insuffisance de matériels d'analyse (notamment pour la DBO₅). Les échantillons ont été prélevés à la sortie des deux bassins, précisément au niveau du siphon d'évacuation de l'effluent. Les figures 5 et 6 présentent une coupe du bassin de maturation avec le « *water column sampler* » plongé dans la colonne d'eau pour effectuer un prélèvement. Le « *water column sampler* » ne touche pas le fond du bassin pour éviter de prendre la boue. Toutefois, il est plongé à plus des ¾ de la profondeur du bassin pour assurer que l'échantillonnage se fait sur toute la colonne d'eau du bassin. La capacité d'échantillonnage de notre dispositif est de 1,5 litre.

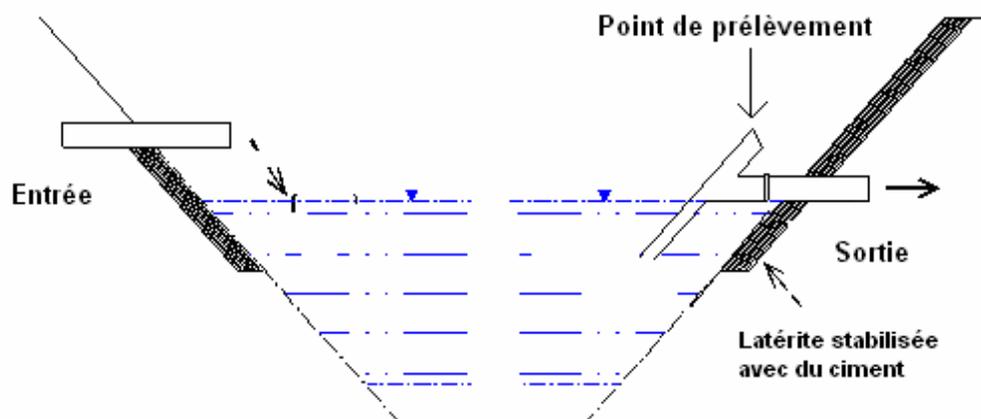


Figure 6 : Point de prélèvement d'échantillons à l'aide du « water column sampler » dans le bassin anaérobie et le bassin de maturation.

5.2.2 Fréquence de prélèvement des échantillons de colonne

Les prélèvements ont été effectués à une fréquence hebdomadaire pendant les cinq premières semaines puis à une fréquence bihebdomadaire pendant les trois dernières semaines. La période d'échantillonnage a duré du 23 mars au 18 mai 2007. Nous avons prélevé des échantillons de colonne à trois périodes différentes de la journée : le premier prélèvement à 10 heures, le deuxième à 16 heures et le troisième à 22 heures. Ces trois périodes de prélèvement ont été choisies non seulement pour les comparer entre elles mais aussi pour savoir à quelle période de la journée (diurne, nocturne) on obtient les résultats les plus proches de l'échantillon composite.

5.2.3 Matériels de prélèvement des échantillons de colonne

Le matériel de prélèvement utilisé est un dispositif appelé « water column sampler ». Ce dispositif est composé d'un tube cylindrique en PVC de 2,10 m de long et de 5 cm de diamètre. Un bouchon en caoutchouc coulisse à l'intérieur du tube et joue le rôle de piston. L'une des extrémités du tube peut être fermée grâce à un bouchon muni d'un robinet qui permet de recueillir l'échantillon d'eau. Les deux bouchons sont reliés par une ficelle.

Le « water column sampler » est plongé dans le siphon situé à la sortie du bassin à une profondeur telle que son extrémité ne touche pas le fond du bassin. L'extrémité étant ouverte, une colonne d'eau monte dans le tube. Cette colonne d'eau est piégée lorsqu'on tire la ficelle et le bouchon muni du robinet ferme l'extrémité plongée dans l'eau. La ficelle est

alors solidement attachée et le tube est retiré du bassin. Le robinet permet de recueillir la colonne d'eau échantillonnée.

Ce dispositif a été utilisé comme matériel alternatif à celui qui a été utilisé par Pearson (1987) qui avait une longueur totale de 1,7 m avec un diamètre de 5 cm [Pearson *et al.*, 1987]. Les différences entre les deux dispositifs sont le fait que le notre est constitué d'un tube unique et il n'est pas transparent alors que celui de Pearson est constitué de trois morceaux de tube, pour la facilité de transport, et il est transparent. Mais cela n'entame en rien la qualité de nos résultats puisque l'auteur précise que des outils alternatifs peuvent bien être utilisés [Pearson *et al.*, 1987].

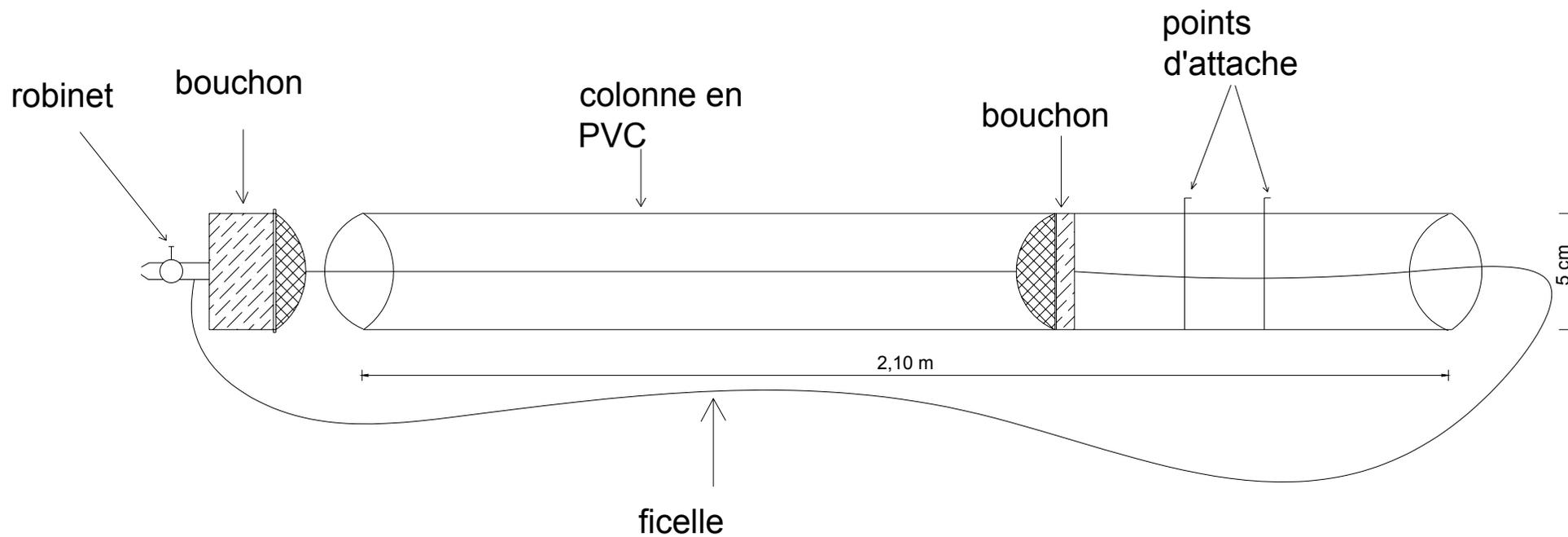


Figure 7 : Dispositif de prélèvement d'échantillons de colonne confectionné au 2iE (LCP-Eau, mars 2007)

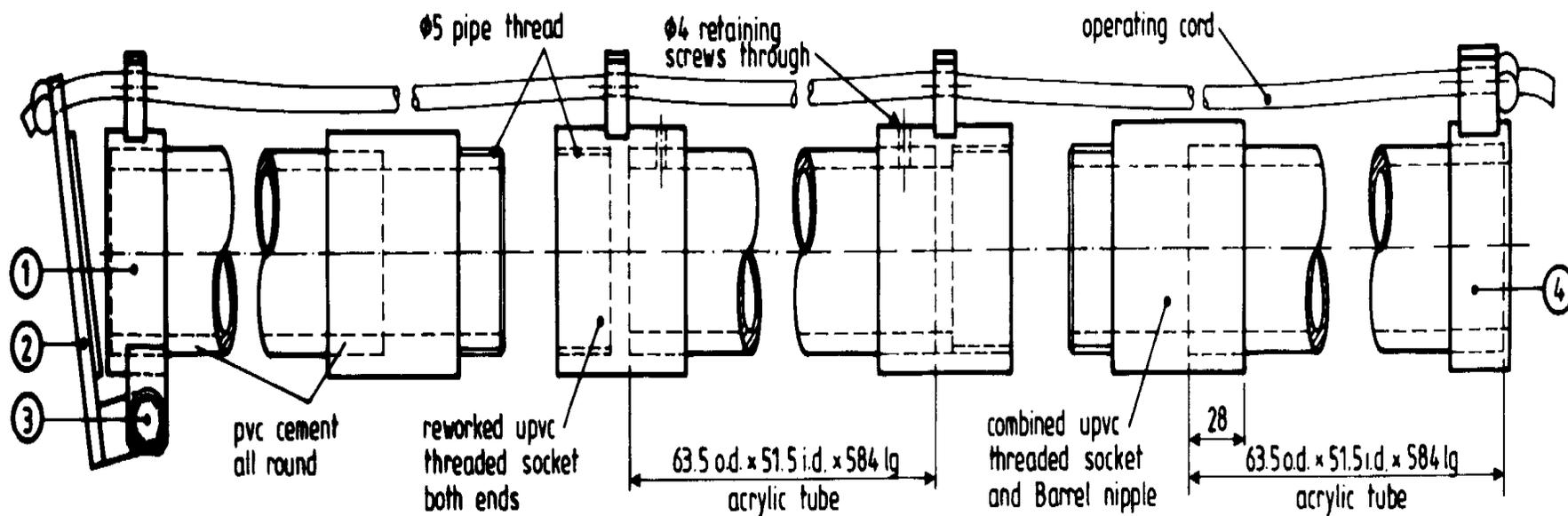


Figure 8 : Dispositif du « water column sampler » utilisé par Pearson pour les prélèvements d'échantillons (1987)



Figure 9 : Séance de prélèvement d'échantillons au « water column sampler » (2iE, mai 2007).

5.3 Méthodes d'analyse des paramètres

Concernant les méthodes d'analyse, le manuel le plus utile s'intitule "Standard methods for the examination of water and waste water" (APHA, 1985).

5.3.1 Paramètres physico-chimiques globaux

Les paramètres physico-chimiques globaux que nous avons mesuré sont : la température, le pH, l'oxygène dissous et la conductivité. Tous ces paramètres ont été mesurés in situ à l'aide d'une sonde multi paramètres de type « multiline set P4 ».

5.3.2 Paramètres de pollution organique

- **Demande Biologique en Oxygène (DBO₅)** : Elle a été mesurée par la méthode d'Oxitop électronique de type WTWDBO CE pat Pending. Cette méthode rapide enregistre directement la respiration de la biomasse dans une enceinte fermée sous atmosphère d'air et d'oxygène. Le test est conduit à température constante de 20°C et l'échantillon est constamment agité. Le dispositif expérimental comprend une étuve thermostatée (20°C) de type UBHERR Bioblock SCIENTIFIC. La mesure de la DBO₅ a été faite sur des échantillons bruts de l'influent et de l'effluent du bassin anaérobie. Pour le bassin facultatif et le bassin de maturation, les mesures de DBO₅ ont été faites sur des échantillons préalablement filtrés sur filtre GFC.

- **Demande Chimique en Oxygène (DCO)** : La mesure de la DCO est obtenue par oxydation chimique en milieu acide fort de la matière organique. On fait agir du bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) en excès sur la matière organique en présence d'acide sulfurique (H₂SO₄). Après minéralisation dans le réacteur DCO 10120 *Bioblock* à 150°C pendant 120 minutes, la DCO est lue à l'aide du spectrophotomètre DR 2000.

- **Matières en suspension (MES)** : Les matières en suspension ont été évaluées par la méthode gravimétrique. Un volume d'échantillon de 50ml est filtré sur une membrane de type GFC (*Whatman*), préalablement pesé. Le dispositif de filtration est composé d'une pompe de type « *vacuubrand* ». Après séchage à 105°C pendant 1h30mn, les MES sont estimées par différence des poids du filtre vide et chargé de matière particulaire. La pesée des filtres est faite à l'aide d'une balance de précision ultrasensible de type *SARTORIUS*. Si M₀ (g) est la masse du filtre à vide, M₁(g) la masse du filtre chargé et V le volume (ml) d'échantillon filtré, les valeurs de MES sont exprimées en mg/l par la formule suivante :

$$MES(mg / l) = \frac{(M_1 - M_0)}{V} \times 1000$$

5.3.3 Les nutriments

- **Azote ammoniacal** : L'azote ammoniacal a été déterminé par dosage acidimétrique (H₂SO₄ 0,02N) après distillation en milieu alcalin. L'expression des résultats en mg/l de

(NH₄⁺) est donnée par la formule
$$N - NH_4^+ (mg / l) = \frac{V_1 \times T \times 1000}{V_0}$$

La formule réduite est : $N - NH_4^+ (mg / l) = V_1 \times 2,8$

- **Nitrates et Orthophosphates** : L'azote sous forme nitrique (N-NO₃⁻) et le phosphore sous sa forme phosphate (P-PO₄³⁻) ont été déterminés par la méthode colorimétrique au moyen du spectrophotomètre HACH DR/2000. Le réactif, nitra ver5, a été utilisé pour les nitrates et

le réactif, molybdovanadate, pour les orthophosphates. Les échantillons ont tous été préalablement filtrés sur des filtres de 0,45 µm.

Le tableau ci-dessous résume les paramètres analysés et les méthodes d'analyse utilisés.

Tableau 3 : Paramètres et méthodes d'analyses

Paramètres	Unités	Méthodes d'analyse
Matière En Suspension (MES)	(mg/l)	AFNOR T90-105
Demande Chimique en Oxygène (DCO)	(mgO ₂ /l)	Standard methods 18 ^e édition
Demande Biologique Oxygène (DBO ₅)	(mgO ₂ /l)	Méthode Oxitop
Azote Ammoniacal (N-NH ₄ ⁺)	(mgN/l)	AFNOR T90-015
Azote Nitrique (N-NO ₃ ⁻)	(mgN/l)	HACH 8039 méthode de réduction au cadmium
Phosphore Total (PT)	(mgP/l)	HACH 8190* méthode de digestion au persulfate acide
Ortho-phosphate (P-PO ₄ ³⁻)	(mgP/l)	HACH 8114* méthode au molybdovanadate

6. Conclusion

Le matériel particulier que nous utilisons pour les prélèvements d'échantillons est le dispositif du « *water column sampler* » qui a été confectionné au 2iE par le LCP-Eau. Quant aux méthodes d'analyses utilisées au laboratoire, ce sont, pour la plupart, des méthodes standardisées et universelles.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Introduction

Ce chapitre présente les rendements épuratoires de chacun des trois bassins de la filière et le résumé de l'analyse des variances effectuée à l'aide du logiciel XLSTAT. Les rendements épuratoires ont été calculés pour chaque bassin afin de comparer leurs efficacités d'élimination des paramètres de pollution. Les résultats de l'analyse des variances (ANOVA) permettent de savoir s'il y a une différence significative entre les valeurs de l'échantillonnage composite de 24 heures et celles de l'échantillonnage au « *water column sampler* ».

2. Résultats de l'étude des performances épuratoires

Durant toute la période des travaux qui a duré du 23 mars au 18 mai, nous avons pu effectuer 10 séries de prélèvements et d'analyses d'échantillons ($n = 10$). La fréquence des prélèvements d'échantillons était hebdomadaire. Mais, suite au colmatage du filtre à gravier situé à l'aval du bassin de maturation, deux semaines de travail ont été perdues. Nous avons alors fait des prélèvements bihebdomadaires pendant les trois dernières semaines. Chacun des six paramètres a été analysé au laboratoire du 2iE en utilisant les méthodes d'analyses présentées dans le tableau 3. Les caractéristiques des eaux brutes qui sont entrées dans la station de traitement durant la période d'étude ont été mesurées et les valeurs sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Caractéristiques des eaux brutes admises dans la station de traitement

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
Température (°C)	28 – 34	DBO ₅ (mg/l)	140 – 300
pH	6,5 – 8,0	DCO (mg/l)	264 – 530
Oxyg. Dissous (mg/l)	0,1 – 2,5	MES (mg/l)	72 – 252
Conductivité (µS/cm)	400 – 750	Nitrates (mg/l)	1,1 – 3,6
Azote amm. (mg/l)	23,2 – 42,3	Ortho-P (mg/l)	3,7 – 6,3

Les caractéristiques de l'influent brut sont assez variables. Cette variabilité est plus remarquable pour les paramètres de pollution organique.

Les teneurs moyennes obtenues pour chaque paramètre, dans chacun des bassins de la filière, sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Valeurs moyennes des paramètres analysés dans chaque bassin

Paramètres	Echantillons composites de 24 h			
	Eau brute	Bassin anaérobie	Bassin facultatif	Bassin de maturation
DBO ₅ (mg/l)	220,0	125,7	27,1	17,1
DCO (mg/l)	399,5	266,8	95,5	90,0
MES (mg/l)	129,5	81,8	83,3	73,5
N-NH ₄ ⁺ (mg/l)	33,6	37,4	21,9	17,2
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	2,0	2,1	1,2	1,4
P-PO ₄ ³⁻ (mg/l)	5,1	5,2	4,5	4,6

Les valeurs moyennes de la DCO et de la DBO₅ restent dans la gamme des valeurs de référence pour les eaux usées d'origine domestique avec un rapport moyen de DCO/DBO₅ de 1,8. Ce rapport étant inférieur à 2 permet de conclure qu'il s'agit d'un effluent brut facilement biodégradable [Metcalf et Eddy, 1991].

2.1 Rendements épuratoires des paramètres de pollution organique

Les rendements épuratoires ont été évalués à partir des résultats du tableau ci-dessus. Pour chaque bassin, c'est la relation suivante qui a été utilisée pour le calcul des rendements épuratoires des différents paramètres de pollution :

$$\text{Rendement}(\%) = \frac{\text{Teneur}_{\text{inf luent}} - \text{Teneur}_{\text{effluent}}}{\text{Teneur}_{\text{inf luent}}} \times 100$$

2.1.1 La Demande Biologique en Oxygène

Les rendements moyens d'élimination de la demande biologique en oxygène des trois bassins et de la filière complète sont présentés à la figure suivante :

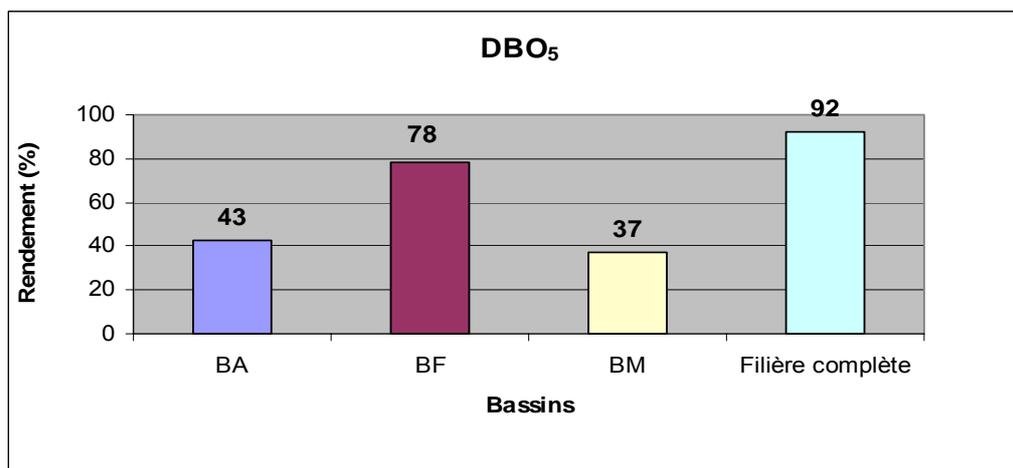


Figure 10 : Rendements d'élimination de la DBO₅ pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

BA = Bassin Anaérobie **BF** = Bassin Facultatif **BM** = Bassin de Maturation

Le bassin facultatif est le plus efficace pour l'élimination de la DBO₅ avec un rendement de 78%. Les bassins anaérobie et de maturation ont des rendements un peu moins importants de 43% et 37%. Le taux d'élimination de la DBO₅ pour toute la filière est important et il atteint 92%. Ce rendement est meilleur à celui trouvé en 2006 qui était de 87% [Maiga *et al.*, 2006].

2.1.2 La Demande Chimique en Oxygène

La figure 8 donne les abattements obtenus pour l'élimination de la DCO dans chacun des bassins de la filière et pour la filière complète.

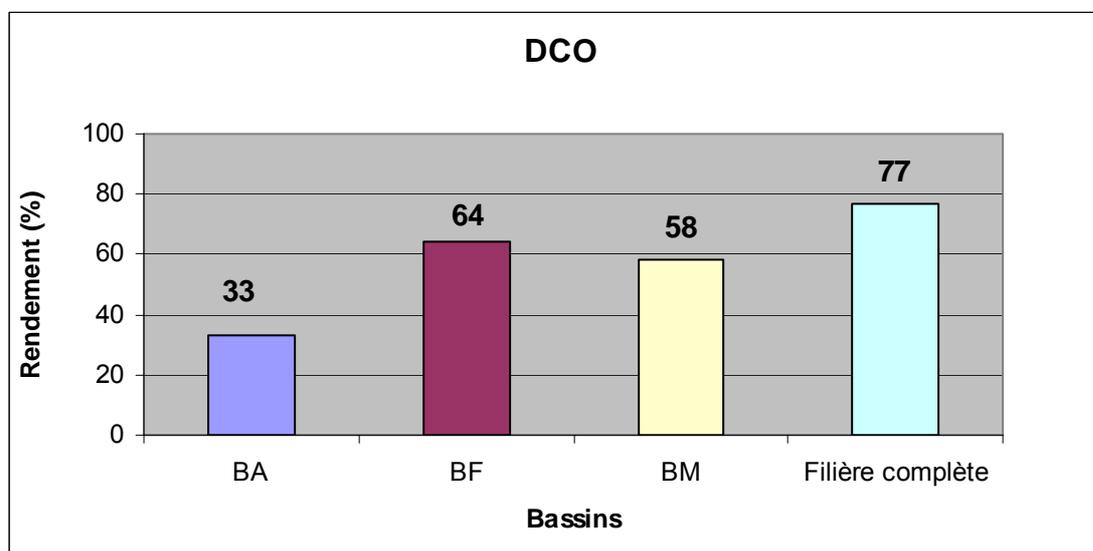


Figure 11 : Rendements d'élimination de la DCO pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

BA = Bassin Anaérobie **BF** = Bassin Facultatif **BM** = Bassin de Maturation

Les bassins facultatif et de maturation sont les plus efficaces parce que c'est dans ces deux bassins qu'on obtient les rendements les plus importants. Ces rendements sont de 64% pour le bassin facultatif et de 58% pour le bassin de maturation. Le bassin anaérobie est aussi actif en termes d'élimination de la DCO mais avec un rendement moindre que celui des deux

autres bassins. Le rendement global de 77% obtenu sur l'ensemble de la filière, est un peu moins important que celui obtenu en 2006 par Maiga *et al.* qui était de 81% .

2.1.3 Les matières en suspension

La figure suivante présente les rendements d'élimination des MES obtenus dans chacun des bassins et pour l'ensemble de la filière de lagunage.

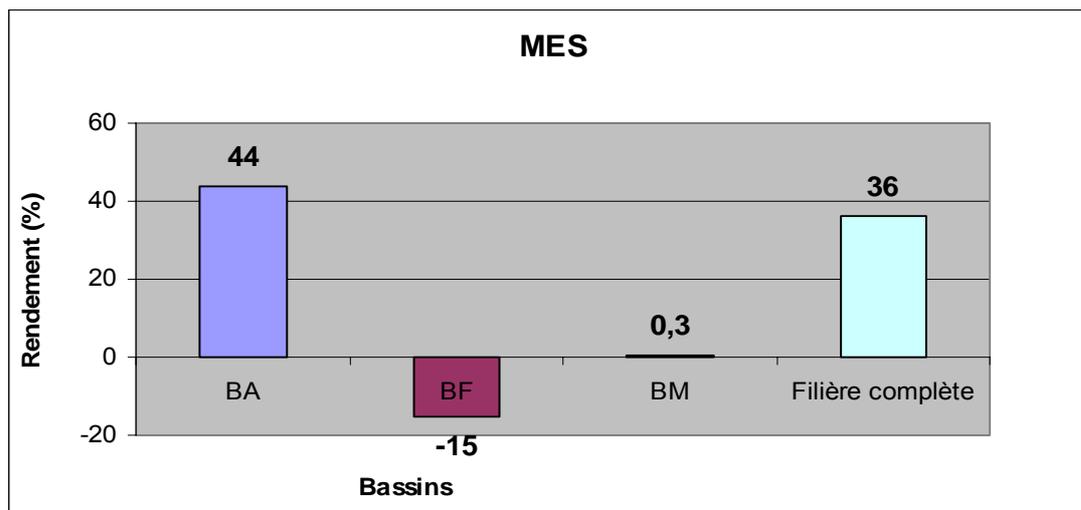


Figure 12 : Rendements d'élimination des MES pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

BA = Bassin Anaérobie **BF** = Bassin Facultatif **BM** = Bassin de Maturation

La majeure partie des matières en suspension est éliminée dans le bassin anaérobie. Il se produit une augmentation de la teneur en matières en suspension dans le bassin facultatif.

2.2 Discussion

Les rendements d'épuration de la DCO et de la DBO₅ ont été relativement constants dans le temps, restant respectivement dans les intervalles de [58% - 86%] et [79% - 96%]. Cette constance en terme de rendement épuratoire en DCO et DBO₅ filtrée confirme la robustesse des systèmes naturels d'épuration des eaux usées, qui peuvent supporter des variations de charge organique tant que celle-ci reste dans la gamme de charge admissible. Pour la DBO₅ filtrée de l'effluent traité, les performances épuratoires ont été supérieures à 80% dans 9 cas sur 10. Le rendement moyen de 92% d'abattement de la DBO₅ est satisfaisant parce qu'il est du même ordre de grandeur que le rendement prévu (>90%) pour une série convenablement dimensionnée de lagunage à microphytes (Mara et Pearson, 1998). L'efficacité du bassin anaérobie comme traitement primaire dans la série s'est traduite par une réduction significative de la pollution organique (DBO₅, DCO, MES) avec des performances

intrinsèques respectives de 43%, 33% et 44%. Il faut signaler que dans des études antérieures, le traitement primaire dans le décanteur primaire n'a pas permis d'atteindre un niveau d'abattement satisfaisant : Radin (1990) rapporte des rendements faibles de 38% pour les MES, et seulement 11% pour la DCO, Klutsé (1995) rapporte un rendement de 22% en DBO₅ sur une performance globale de 76% pour la succession ancienne ; décanteur primaire+BF+BM avec un temps de rétention hydraulique (TRH) de 16,2 jours. La raison fondamentale du faible rendement au niveau du décanteur primaire statique serait un défaut de soutirage régulier des boues. Celles-ci ont entraînés avec des charges trop élevées (1500 kg/ha/jour selon Klutsé, 1995) dans le bassin facultatif qui fonctionnait ainsi en surcharge. Avec l'introduction du bassin anaérobie, l'impact positif relevé est sa capacité de laminage des pics de pollution protégeant ainsi le bassin facultatif contre les à coups de charge [Maiga *et al.* 2006]. Cependant, les performances du bassin anaérobie sont légèrement en dessous des attentes qui sont de 60% à 70% à 25°C et pour des charges organiques variant entre 100 et 350 g DBO₅/m³/j [Varon et Mara, 2004].

Le bassin facultatif est le plus efficace de la série en terme d'élimination de la pollution carbonée parce qu'il donne des rendements épuratoires supérieures aux deux autres bassins. Ses performances intrinsèques d'abattement de la DBO₅ et de la DCO sont respectivement de 78% et 64%. La littérature indique qu'un bassin facultatif élimine près de 70% de la DBO₅ d'échantillons non filtrés et plus de 90% pour des échantillons filtrés [Varon et Mara, 2004]. Les performances du bassin facultatif sont tout de même satisfaisantes parce que d'autres études indiquent que les attentes en terme d'élimination de la pollution carbonée se situent entre 60 et 80% [Mara, 1998]. L'efficacité du bassin facultatif s'explique par le fait qu'il reçoit des eaux issues du bassin anaérobie, donc moins chargées. Le temps de rétention hydraulique d'environ 10 jours est aussi une des raisons de son efficacité épuratoire vis-à-vis de la pollution carbonée. Cependant, il se produit une sensible augmentation de la teneur en MES dans le bassin facultatif. Cette augmentation de la teneur en matières en suspension est due à la forte présence d'algues dans ce bassin. Ces algues étant des organismes flottants dans la masse d'eau, elles contribuent à l'augmentation de la teneur en matières en suspension. A la sortie du bassin de maturation, on relève une variation importante des concentrations en MES avec un coefficient de variation de 22% pour une teneur moyenne de 83 mg/l. Les concentrations résiduelles en MES de l'effluent du bassin de maturation étaient parfois supérieures à celles de l'influent entrant dans le système. Cela s'explique par le fait que l'étude a été menée pendant la période de chaleur et cette période correspond à la période de développement abondant du phytoplancton. En effet, la période de « *bloom algal* » est caractérisée par une pollution organique de néoformation qui gêne souvent l'abattement de la pollution et peut empêcher l'atteinte des objectifs de qualité en terme de concentration résiduelle en MES. Ce

phénomène apparaît surtout dans le bassin facultatif et le bassin de maturation [Maiga *et al.* 2006].

2.3 Rendements épuratoires des nutriments

2.3.1 L'azote ammoniacal et les nitrates

Les figures suivantes présentent les rendements d'élimination des nutriments azotés ; à savoir l'azote ammoniacal et les nitrates.

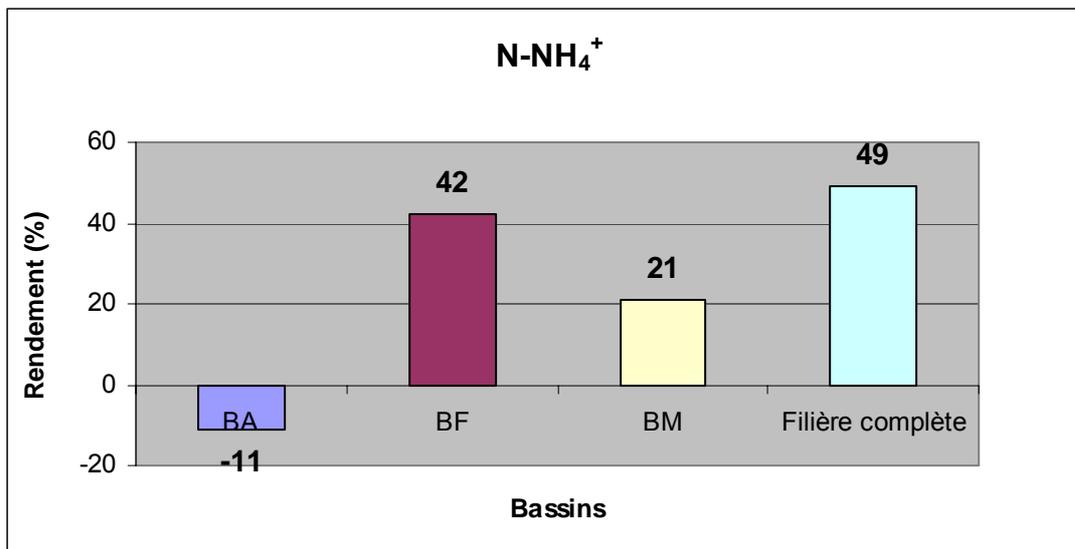


Figure 13 : Rendements d'élimination de l'azote ammoniacal pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE. **BA** = Bassin Anaérobie **BF** = Bassin Facultatif **BM** = Bassin de Maturation

Le bassin facultatif et le bassin de maturation sont les deux bassins qui assurent l'élimination de l'azote ammoniacal avec des rendements respectifs de 42% et 21%. Le rendement obtenu sur l'ensemble de la filière est de 49%.

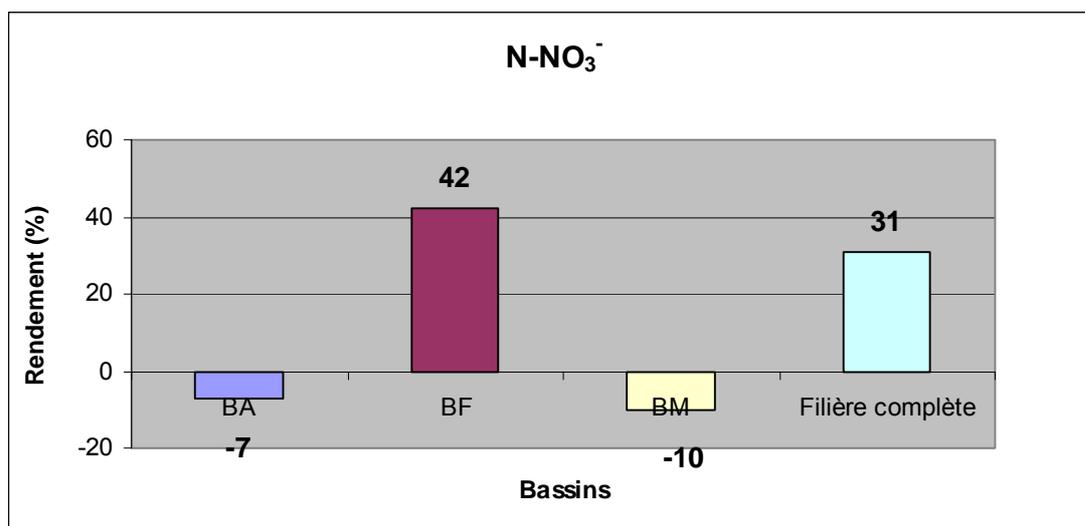


Figure 14 : Rendements d'élimination des nitrates pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

BA = Bassin Anaérobie **BF** = Bassin Facultatif **BM** = Bassin de Maturation

Le bassin facultatif élimine la plus grande partie d'azote ammoniacal et de nitrates avec un rendement d'élimination de 42%. Le bassin de maturation est également un siège d'élimination de l'azote ammoniacal avec un taux d'élimination de 21%. Le bassin anaérobie n'a pratiquement pas d'effet sur l'élimination des composés azotés.

2.3.2 Les orthophosphates

La figure 15 présente les rendements obtenus pour l'élimination des nutriments phosphorés représentés par les orthophosphates.

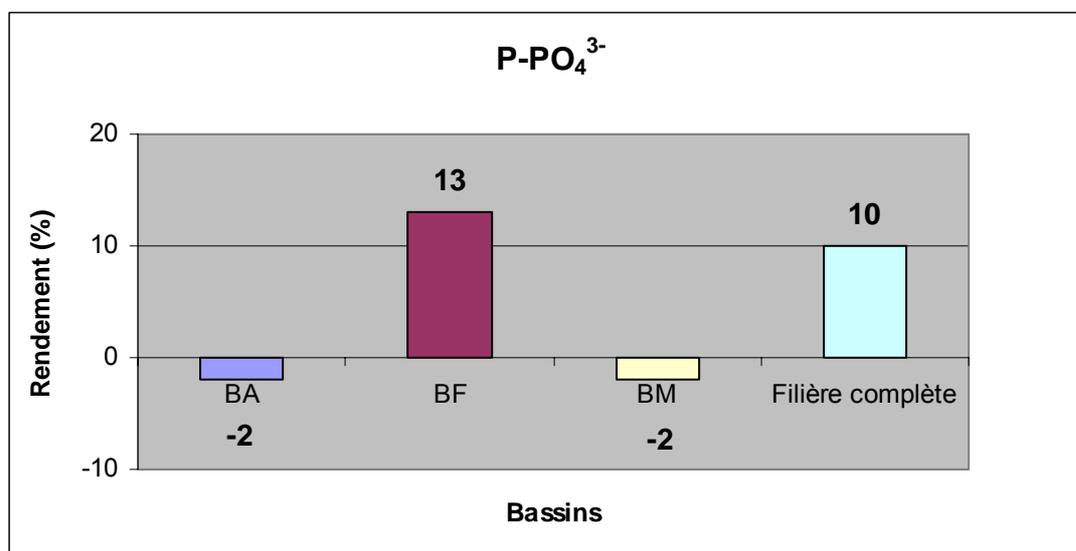


Figure 15 : Rendements d'élimination des orthophosphates pour chaque bassin et pour toute la filière de lagunage du 2iE.

BA = Bassin Anaérobie **BF** = Bassin Facultatif **BM** = Bassin de Maturation

Le bassin facultatif et le bassin de maturation sont les deux bassins qui assurent l'élimination des orthophosphates. Les orthophosphates sont éliminés en grande partie au niveau du bassin facultatif mais avec un taux d'élimination relativement faible (13%).

2.4 Discussion

La teneur résiduelle moyenne en orthophosphates de l'effluent à la sortie de la filière est de 4,6 mg/l. Cette valeur est très élevée par rapport à la limite tolérable de 0,1 mg/l en phosphore total pour un rejet d'effluents dans un milieu sensible à l'eutrophisation (Ayers et Westcot, 1985 ; WHO, 1989). Des rendements négatifs en orthophosphates ont souvent été observés. Cela est dû au phénomène de remontées de boues dans les bassins et plus particulièrement dans le bassin anaérobie [Maiga *et al.* 2006].

Les résultats des mesures des nutriments azotés présentent des niveaux d'abattement variés par bassin. C'est le cas, par exemple de l'azote ammoniacal dont la teneur présente une légère augmentation dans le bassin anaérobie (Tableau 5). Dans ce bassin, l'azote organique est hydrolysé en azote ammoniacal, la concentration en azote ammoniacal de l'effluent sortant de ce bassin peut donc être supérieure à celle de l'influent brut entrant. Dans notre étude, l'azote ammoniacal a évolué de 33,6 mg/l en moyenne à 37,4 mg/l en moyenne dans l'effluent à la sortie du bassin anaérobie, soit une augmentation moyenne d'environ 10,2% dans ce bassin. Silva *et al.* (1995) ; Mara *et al.* (2001) rapportent un pourcentage d'augmentation des teneurs en azote ammoniacal de 29,2% sur un bassin anaérobie au Nord-Est du Brésil. A l'inverse, dans le bassin de maturation, l'élimination de l'azote est de mise, avec un abattement de 21% en moyenne. En effet, les valeurs de pH variant de 7,3 à 9,4 dans ce bassin justifient amplement l'abattement de l'azote par *stripping*. Pour un temps de rétention hydraulique (TRH) total de 18 jours, le rendement cumulé en azote ammoniacal obtenu pour l'ensemble de la filière est évalué à 48,7% en moyenne. Selon les données de la littérature, le rendement d'élimination de l'azote ammoniacal dans une filière de lagunage à microphytes est très variable. Certains auteurs aboutissent à des valeurs de rendement plus faibles moins de 10% (Silva *et al.*, 1987). Silva (1987) rapporte, sur une filière de 5 bassins en série (un bassin anaérobie, un bassin facultatif et trois bassins de maturation) des rendements de 32%, 48% et 81% respectivement pour des TRH de 8,5 jours, 17 jours et 29,1 jours.

La charge en nitrate de l'influent brut entrant dans le système montre des concentrations variant de 1,1 mg/l à 3,6 mg/l avec une moyenne de 2,0 mg/l. La présence des nitrates en faible concentration pourrait être le fait d'une légère nitrification de l'effluent dans le réseau de conduite en écoulement gravitaire et éventuellement dans la bêche de relevage d'où sont collectées les eaux usées non traitées [Maiga *et al.* 2006]. L'évolution des nitrates, le long de

la filière montre une diminution allant de 2,0 mg/l en moyenne dans l'influent brut à 1,4 mg/l en moyenne dans l'effluent traité.

2.5 Elimination de la pollution bactérienne et parasitaire

Dans la littérature, l'abattement de la pollution bactérienne et parasitaire a été étudié avec comme indicateurs, d'une part, les coliformes fécaux, et d'autre part, les œufs d'helminthes et les kystes de protozoaires. Ainsi, des études menées par Maiga *et al* (2006) sur la présente filière de lagunage rapportent des valeurs élevées d'abattement de la charge en coliformes fécaux avec un maximum de 4,9 ulog pendant les fortes périodes d'ensoleillement et de grandes températures. Cependant, ce rendement est jugé peu satisfaisant puisque les teneurs résiduelles (3,71 ulog) restent tout de même supérieures à la norme OMS (≤ 3 ulog) pour une réutilisation non restrictive en irrigation malgré un temps de séjour moyen de 18 jours dans les trois bassins [Maiga *et al.* 2006]. Par ailleurs, la même étude révèle un rendement constant de 100% d'abattement des parasites notamment les œufs d'helminthes et les kystes de protozoaires.

3. Comparaison des deux modes d'échantillonnage

Les résultats des analyses ont été traités par l'analyse des variances (ANOVA) en utilisant le logiciel XLSTAT. L'analyse de la variance (terme souvent abrégé par le terme anglais ANOVA : ANalysis Of VAriance) est une technique statistique permettant de comparer les moyennes de plus de deux populations. C'est une méthode pour étudier les différences de moyenne entre populations (par exemple, trois populations ont-elles la même moyenne ? ou autrement dit, les différences de moyenne entre les trois populations sont-elles significatives ?) Cette méthode, néanmoins, doit son nom au fait qu'elle utilise des mesures de variance afin de déterminer le caractère significatif, ou non, des différences de moyenne mesurées sur les populations. Le but ici est donc de comparer des moyennes de différents groupes et de dire si, parmi l'ensemble, au moins une d'entre elles diffère des autres. Plusieurs tests développés par des auteurs différents permettent de faire cette analyse. La technique du HSD de Tukey permet de comparer toutes les paires de moyennes et d'y montrer des différences avec un risque d'erreur. Les quatre types d'échantillons ont donc été comparés deux à deux. Pour chaque paramètre, le test a été effectué sur l'ensemble des valeurs à un intervalle de confiance de 95%, soit une probabilité d'erreur de 5%.

Les résultats du test révèlent, pour chaque paramètre et pour chacun des deux bassins, qu'il n'y a aucune différence significative entre les valeurs des échantillons composites de 24 heures et celles des échantillons de colonne. En d'autres termes, les échantillons composites de 24 heures et les échantillons de colonne ne diffèrent pas significativement par leur teneurs en DBO_5 , DCO , MES , N-NH_4^+ , N-NO_3^- , P-PO_4^{3-} ($p > 0,05$). Les détails de ces résultats sont consignés en annexes. L'analyse des variances s'est faite bassin par bassin.

En plus de l'analyse des variances, deux autres grandeurs ont été choisies pour comparer les deux modes d'échantillonnage. Il s'agit de l'écart-type et du coefficient de variation. L'écart-type et le coefficient de variation sont des grandeurs qui permettent de comparer des séries de valeurs mais à des degrés de signification différents. L'écart type est un critère de dispersion. Il mesure l'écart à la moyenne observée (et non à la moyenne théorique) et correspond à la moyenne des écarts entre les valeurs observées et la moyenne de ces valeurs observées. Cependant, il n'est pas toujours facile d'évaluer l'importance que doit avoir l'écart-type pour que les données soient largement dispersées. L'importance de l'écart-type dépend de l'importance de la valeur moyenne de l'ensemble des données. Voilà pourquoi il est parfois utile de travailler, dans certains cas, sur l'écart type relatif (écart-type quotienté par la moyenne) : le coefficient de variation. Plus la valeur du coefficient de variation est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande.

3.1 Comparaison des données du bassin anaérobie

Les données recueillies après les analyses au laboratoire et qui ont servi à faire l'analyse des variances au niveau du bassin anaérobie sont présentées dans le tableau suivant. Ce tableau comporte les données relatives aux échantillons composites et des échantillons de colonne. Ces données ont été collectées sur 10 séries d'échantillons (n = 10).

Tableau 6 : Valeurs moyennes des paramètres des échantillons de colonne du bassin anaérobie

Paramètres	Echantillons composites	Echantillons de colonne		
		Colonne 10h	Colonne 16h	Colonne 22h
DBO ₅ (mg/l)	125,7	122,9	134,3	140
DCO (mg/l)	266,8	274,4	267	267,6
MES (mg/l)	81,8	85,4	91,9	78,9
N-NH ₄ ⁺ (mg/l)	37,4	37,1	38	37,4
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	2,1	2,1	2,1	2,1
P-PO ₄ ³⁻ (mg/l)	5,2	5,5	5,4	5,6

Les valeurs de DBO₅ des échantillons de colonne de 22 heures sont les plus élevées. Les plus faibles valeurs étant relevées au niveau des échantillons de 10 heures. Pour la DCO, ce sont plutôt les valeurs des échantillons de colonne de 10 heures qui sont les plus importantes. Quant aux matières en suspension (MES), les plus fortes valeurs sont relevées pour les échantillons de 16 heures. Cela peut s'expliquer par la remontée des boues pendant

les heures de forte chaleur. Les valeurs moyennes des nutriments sont pratiquement les mêmes pour tous les échantillons. Cela permet de dire que l'analyse des nutriments peut être faite aussi bien par l'échantillonnage composite de 24 heures que par l'échantillonnage au « *water column sampler* ».

L'étude est allée plus loin dans la comparaison des deux modes d'échantillonnage par le calcul de deux autres grandeurs qui servent aussi à faire la comparaison de séries de valeurs. Ces deux grandeurs sont l'écart-type et le coefficient de variation.

Le tableau suivant est le récapitulatif du calcul des écarts types et du coefficient de variation obtenus à partir des séries d'échantillons composites et d'échantillons de colonne au niveau du bassin anaérobie.

Tableau 7 : Comparaison des valeurs moyennes journalières des données du bassin anaérobie basée sur des séries d'échantillons composites de 24 heures et des échantillons de colonne

Paramètres	Type échantillon	Intervalle (max – min)	Valeur moyenne	Ecart-type (\pm)	Coefficient de variation (%)
DBO ₅ (mg/l)	E	180 - 80	125,7	9,6	
	C	200 – 80	132,4	15,0	11,5
DCO (mg/l)	E	308 – 240	266,8	28,9	
	C	360 – 204	269,7	29,4	4,0
MES (mg/l)	E	142 – 60	81,8	24,5	
	C	175 – 52	85,4	25,3	8,5
N-NH ₄ ⁺ (mg/l)	E	42,9 - 31,4	37,4	4,0	
	C	43,2 – 30,5	37,5	3,8	1,8
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	E	3,2 - 1,5	2,1	0,3	
	C	3,2 – 1,0	2,1	0,3	4,9
P-PO ₄ ³⁻ (mg/l)	E	5,7 - 4,5	5,2	0,6	
	C	6,4 – 4,6	5,5	0,6	4,4

E = Echantillons Composites de 24 h

C = Echantillons de Colonne

3.2 Comparaison des données du bassin de maturation

Les données recueillies après les analyses au laboratoire et qui ont servi à faire l'analyse des variances au niveau du bassin de maturation sont présentées dans le tableau suivant. Ces données ont été collectées sur 10 séries d'échantillons (n = 10).

Tableau 8 : Valeurs moyennes des paramètres des échantillons de colonne du bassin de maturation

Paramètres	Echantillons de colonne			
	Echantillons composites	Colonne 10h	Colonne 16h	Colonne 22h
DBO ₅ (mg/l)	17,1	20,0	18,6	17,1
DCO (mg/l)	90,0	91,5	91,4	89,4
MES (mg/l)	73,5	75	82,1	70,5
N-NH ₄ ⁺ (mg/l)	17,2	17,3	17,2	17,1
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	1,4	1,3	1,3	1,4
P-PO ₄ ³⁻ (mg/l)	4,6	4,8	4,5	4,6

Le tableau suivant est le récapitulatif du calcul des écarts types et du coefficient de variation obtenus à partir des 10 séries d'échantillons composites et d'échantillons de colonne au niveau du bassin de maturation (n = 10).

Tableau 9 : Comparaison des valeurs moyennes journalières des données du bassin de maturation basée sur des séries d'échantillons composites de 24 heures et des échantillons de colonne

Paramètres	Type échantillon	Intervalle (max – min)	Valeur moyenne	Ecart-type (±)	Coefficient de variation (%)
DBO ₅ (mg/l)	E	50 – 10	17,1	42,7	23,8
	C	40 – 10	18,6	43,1	
DCO (mg/l)	E	162 – 67	90,0	23,2	4,0
	C	170 – 58	90,8	34,8	
MES (mg/l)	E	112 - 52	73,5	25,6	8,4
	C	112 – 45	75,9	32,1	
N-NH ₄ ⁺ (mg/l)	E	20,8 - 11,4	17,2	3,7	4,0
	C	22,3 – 11,2	17,2	3,9	
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	E	2,1 - 1,1	1,4	0,7	7,2
	C	2,1 – 1,0	1,3	0,7	
P-PO ₄ ³⁻ (mg/l)	E	5,9 - 3,8	4,6	0,4	5,2
	C	6,3 – 3,7	4,6	0,4	

E = Echantillons Composites de 24 h

C = Echantillons de Colonne

3.3 Commentaire

Les résultats de l'analyse des variances montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les valeurs des échantillons composites et celles des échantillons de colonne aussi bien pour le bassin anaérobie que pour le bassin de maturation.

Les écart-types des valeurs des échantillons composites et des échantillons du « *water column sampler* » sont très proches pour l'ensemble des paramètres des deux bassins. Cela signifie que l'échantillonnage au « *water column sampler* » est aussi fiable que l'échantillonnage composite de 24 heures. Il faut aussi noter que les écart-types obtenus pour les valeurs des paramètres de pollution organique sont plus élevés que ceux des nutriments. Cette différence est due au fait que les paramètres de pollution organique et les nutriments n'ont pas le même ordre de grandeur. En effet, en comparant, par exemple, les intervalles des données de la DBO₅ et de la DCO du bassin anaérobie, il apparaît que ces paramètres ont des ordres de grandeur de plus de 100 mg/l qui sont largement supérieurs à ceux des nutriments. Donc les écart-types de ces deux paramètres montrent que la déviation standard des valeurs par rapport à la moyenne est faible. Pearson *et al.* (1987) effectuant la même étude comparative sur un bassin anaérobie au Nord-Est du Brésil ont obtenu des écart-types de 103 et 18 mg/l pour la DCO respective des échantillons composites et des échantillons de colonne. A Loures, au Portugal, l'étude réalisée sur une série de bassins facultatif et de maturation a fourni, pour la DCO, des écart-types de 272 et 39 mg/l respectivement pour les échantillons composites et les échantillons de colonne [Pearson *et al.*, 1987]. Dans notre cas, au niveau du bassin anaérobie, les écart-types de la DCO sont de 28,9 pour les échantillons composites et de 29,4 pour les échantillons de colonne. Le niveau de précision des données est donc satisfaisant en comparaison avec celui obtenu au Nord-Est du Brésil. Cette étude est allée plus loin en calculant les coefficients de variation pour chaque paramètre. Pour la DCO, ce coefficient est de 4% aussi bien au niveau du bassin anaérobie que du bassin de maturation. Ainsi, il n'y a pratiquement pas de variation entre les valeurs moyennes de la DCO des échantillons de colonne et celles des échantillons composites. C'est également le cas pour la DBO₅ et les matières en suspension.

Les écart-types sont encore plus faibles pour les nitrates et les orthophosphates. Cela revient à dire que l'erreur standard que l'on fait en analysant, en général, les nutriments par l'une ou l'autre des deux méthodes d'échantillonnage est très faible. Les faibles coefficients de variation obtenus pour les nutriments confirment davantage le fait que l'échantillonnage composite de 24 heures peut être substitué par l'échantillonnage au « *water column sampler* » pour l'analyse des nutriments. De manière générale, les coefficients de variation sont inférieurs à 25%. En effet, Singh et Westlake (2005) proposent la valeur de 25% comme seuil de précision du coefficient de variation lorsque la taille de l'échantillon est < 55. Or les coefficients de variation que nous avons calculé sont tous < 25%. Il s'en suit que l'usage

d'échantillons de colonne pour caractériser un effluent est tout aussi précis que l'usage d'échantillons composites parce que l'erreur qu'on commet est insignifiante.

3.4 Comparaison des valeurs des échantillons du « *water column sampler* »

L'analyse des variances (ANOVA) a permis de comparer les données de chacune des trois séries d'échantillons du « *water column sampler* » avec les échantillons composites de 24 heures. Les résultats du test ont montré qu'il n'y a aucune différence significative entre toutes les valeurs. Aussi, les coefficients de variation sont tous inférieurs au seuil de 25% (pour $n < 55$) [Singh et Westlake, 2005]. Cela permet de déduire que les échantillons prélevés à 10 heures, à 16 heures et à 22 heures sont tous représentatifs de l'échantillon moyen journalier. Nous voulons à présent savoir laquelle de ces trois périodes donnent les valeurs les plus proches de celles de l'échantillon composite. Pour cela, nous allons comparer les valeurs moyennes des échantillons de colonne avec celles des échantillons composites de 24 heures, pour chaque paramètre analysé. Les valeurs moyennes obtenues sur le bassin anaérobie sont récapitulées dans le tableau 6 et celles du bassin de maturation sont récapitulées dans le tableau 8. Il apparaît que chacune des heures de prélèvement au « *water column sampler* » donne des valeurs moyennes proches de celles de l'échantillon composite. Donc, a priori, les prélèvements au « *water column sampler* » peuvent se faire à n'importe quelle période de la journée. Mais, nous suggérons de faire les prélèvements entre 8 heures et 10 heures du matin. En effet, Pearson *et al.* (1996) effectuant une étude au Nord-Est du Brésil ont fait les prélèvements au « *water column sampler* » à 8 heures du matin. Cette période de prélèvement serait donc la mieux indiquée.

3.5 Conclusion

Les résultats montrent de bons rendements épuratoires pour la pollution carbonée (DCO et DBO₅). Les rendements d'élimination des nutriments restent un peu faibles puisque les valeurs résiduelles ne répondent pas entièrement aux normes de rejet dans un écosystème sensible à l'eutrophisation. La comparaison de l'échantillonnage composite de 24 heures et de l'échantillonnage au « *water column sampler* » montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les valeurs obtenues au cours des analyses au laboratoire. Par conséquent, les prélèvements au « *water column sampler* » peuvent se faire à n'importe quelle période de la journée.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a permis, dans un premier temps, d'évaluer les performances épuratoires de la filière de lagunage à microphytes du 2iE en utilisant des échantillons composites de 24 heures. Les résultats des analyses des échantillons ont permis de déterminer les rendements épuratoires pour les paramètres de pollution organique et les nutriments. Ainsi, les rendements obtenus sont de 92% pour l'élimination de la DBO₅, 77% pour l'abattement de la DCO et 36% pour l'élimination des MES. Les teneurs résiduelles sont de 17 mg/l pour la DBO₅, 90 mg/l pour la DCO et 83 mg/l pour les MES. Ces résultats sont donc satisfaisants puisque les seuils maximum suggérés par la réglementation européenne sont de 25 mg/l pour la DBO₅, 100 mg/l pour la DCO et 150 mg/l pour les MES. Cependant, les rendements d'élimination des nutriments sont relativement faibles. Les taux d'élimination sont de 49% pour l'azote ammoniacal, 31% pour les nitrates et 10% pour les orthophosphates. Les teneurs résiduelles sont alors de 17,2 mg/l pour l'azote ammoniacal, 1,4 mg/l pour les nitrates et 4,6 mg/l pour les orthophosphates. Ces valeurs sont au-delà du seuil fixé par la réglementation européenne qui préconise une teneur résiduelle de 5 mg/l pour l'azote total et 0,1 mg/l pour le phosphore total. Les effluents traités ne devraient donc pas être rejetés directement dans des écosystèmes sensibles à l'eutrophisation tels que les barrages et autres cours d'eau. Cependant, ils pourraient bien convenir pour un usage en agriculture parce que les nutriments contribuent à la bonne croissance des plantes. Il faudrait pour cela que ces effluents respectent les normes en matière de qualité bactériologique. Les normes OMS indiquent des teneurs résiduelles ≤ 3 ulog pour une réutilisation non restrictive en irrigation.

L'étude a également permis de comparer l'échantillonnage composite de 24 heures et l'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* ». Cette comparaison a été faite par l'analyse des variances (ANOVA) des résultats des paramètres de pollution organique et des nutriments. Ainsi, le test de Tukey, effectué à l'aide du logiciel XLSTAT à un intervalle de confiance de 95%, révèle qu'il n'y a aucune différence significative entre les valeurs des échantillons composites et celles des échantillons de colonne, ce pour tous les paramètres étudiés et à n'importe quel moment de prélèvement. Il en ressort donc que l'échantillonnage en colonne à l'aide du « *water column sampler* » est une méthode raisonnablement efficace qui permet d'obtenir des valeurs moyennes quotidiennes représentatives de la qualité d'un effluent.

Cela conduit à préconiser l'échantillonnage au « *water column sampler* » comme mode d'échantillonnage pour l'étude des performances épuratoires du lagunage sous climat

sahélien parce qu'elle est rapide, précise et nécessite peu de ressources. Cependant, étant donné que cette étude se situe dans le cadre des travaux de recherche entrepris par le LCP-Eau du 2iE, il serait judicieux de prolonger la durée des essais avant d'adopter définitivement l'échantillonnage au « *water column sampler* » comme mode d'échantillonnage pour l'étude des performances épuratoires du lagunage en zone sahélienne.

Dans le souci d'améliorer la qualité des résultats pour les campagnes à venir, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- La poursuite des essais pendant les autres saisons climatiques de l'année pour la validation de l'échantillonnage au « *water column sampler* » comme mode d'échantillonnage représentatif d'une journée quelque soit la saison.
- L'acquisition d'un « *water column sampler* » transparent et plus pratique pour assurer un meilleur prélèvement d'échantillons.
- L'acquisition d'un débitmètre pour une meilleure estimation des débits et de la charge organique à l'entrée de la filière.
- La création d'un ouvrage de dérivation ou by-pass à la sortie du bassin de maturation pour assurer la continuité des écoulements au cas où le filtre à gravier, situé à l'aval de la filière, est colmaté.
- Le non rejet des effluents traités dans des écosystèmes sensibles à l'eutrophisation tels que les barrages et les cours d'eau.
- L'utilisation de ces effluents traités en agriculture après vérification de leur conformité aux normes de qualité bactériologique.

A travers cette étude, l'Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) se positionne comme l'un des leaders en matière de recherche dans le domaine du lagunage en zone sahélienne. En effet, cette étude est la base d'une solution rapide et surtout efficiente de collecte de données fiables permettant de juger de l'efficacité d'un système de lagunage sous climat sahélien. Cette initiative doit donc se poursuivre pour aboutir à l'adoption définitive de l'échantillonnage au « *water column sampler* » non seulement au 2iE mais aussi dans les autres stations de lagunage du Burkina Faso et de la sous région.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR, (1997). *Qualité de l'eau : terminologie, échantillonnage et évaluation de méthodes*, Recueil de normes françaises, tome 1, 2^{ème} édition.

Arthur, J.P. (1983). *Notes on the Design and Operation of waste Stabilization Ponds in Warm Climates of Developing Countries*. Technical Paper N°7, Washington, D.C: The World Bank.

Ayers, R.S and Westcot, D.W. (1985). *Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage*, Paper N°29. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome.

Berland, J.M., Boutin, C., Molle, P. et Cooper, P. (1991). *Guide des procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptés aux petites et moyennes collectivités (500-5000 eq-hab)*, Commission Européenne, Office des publications des communautés Européennes - Luxembourg, 42 p.

Edeline, F. (1993). *L'épuration biologique des eaux : théorie et technologie des réacteurs*, TEC & DOC-Lavoisier, 303 p.

Greenberg, A. E., Clesceri, L. S., Eaton, A. D. (1992). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, APHA, 18^{ème} édition.

Klutsé, A. (1995). *Epuration des eaux usées domestiques par lagunage en zone soudano-sahélienne, Ouagadougou*, Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 160 p.

Koné, D. (2002). *Epuration des eaux usées par lagunage à microphytes et à macrophytes en Afrique de l'Ouest et du Centre : état des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement*, Thèse de doctorat, EPFL – Lausanne, 170 p.

Maiga, A. H., Konaté, Y., Wéthé, J., Denyigba, K., Zoungrana, D., Togola, L., (2006). *Performances épuratoires d'une filière de trois étages de bassins de lagunage à microphytes sous climat sahélien : cas de la station de traitement des eaux usées de l'EIER*, Sud Sciences et Technologies, N° 14.

Mara, D. D., Pearson, H. W., (1998). *A design manual for waste stabilization pond effluent used for restricted irrigation in Valle Del Cauca, Colombia*. Wat. Sci. Tech., 45(1), pp 139-143.

Metcalf and Eddy, Inc. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd Ed., Mc Graw-Hill International Editions, New York, USA.

Pearson, H. W., Mara, D. D., Konig, A., Oliveira, R. de, Mills, S. W., Smallman, D. J., and Silva, S. A. (1987). *Water column as a rapid and efficient method of determining effluent quality and the performance of waste stabilization ponds*, Water Science and Technology, vol. 19, N°12, pp 109-113.

Pearson, H. W., Mara, D. D., and Bartone, C. R., (1987). *Guidelines for the minimum evaluation of the performance of full-scale waste stabilisation pond systems*, War. Res. vol. 21, N°9, pp. 1067-1075, 1987.

Pearson, H. W., Mara, D. D., Cawlay, Arridge, L. R., and Silva, S. A., (1996). *The performances of an innovative tropical experimental waste stabilisation ponds system operating at high organic loadings*, Water Science and Technology, vol. 33, N°7, pp 63-73.

Silva, S. A., Mara, D.D., and Oliveira, R. de. (1987). *The performance of five deep waste stabilization ponds in northeast Brazil*. Wat. Sci. Tech. 19 (12), pp 123-130.

Singh, A.C. et Westlake, M. (2005). *Coefficient de variation discriminant : une mesure améliorée de la précision des estimations*. Recueil du Symposium 2005 de Statistique Canada.

Soares, J., Silva, S. A., Araujo, A. L. C., Mara, D. D., Pearson, H. W., (1996). *Ammonia removal in a pilot-scale WSP complex in Northeast Brazil*, Water Science and Technology, vol. 33, N°7, pp 165-171.

Togola, L., (2004). *Etude comparée des performances épuratoires de 2 filières de traitement biologique des eaux domestiques par lagunage : cas de la station pilote de l'EIER*, Mémoire d'ingénieur, EIER, Ouagadougou – Burkina Faso, 79 p.

Varon, M. P. et Mara, D. D., (2004). *Waste stabilisation ponds*, IRC, International Water and Sanitation Centre.

Wéthé, J., Radoux, M., Tanawa, E., (2003). *Assainissement des eaux usées et risques socio sanitaires et environnementaux en zones d'habitat planifié de Yaoundé (Cameroun)*, VertigO, la revue en sciences de l'environnement sur le web, vol. 4, N°1.

WHO (1989). *Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*. Technical. Technical report series N°778, World Health Organization, Geneva.

ANNEXES

Annexe 1 : Résultats de l'analyse des variances de la DBO₅ au niveau du bassin anaérobie.

Annexe 2 : Résultats de l'analyse des variances de la DCO au niveau du bassin anaérobie.

Annexe 3 : Résultats de l'analyse des variances des MES au niveau du bassin anaérobie.

Annexe 4 : Résultats de l'analyse des variances de l'azote ammoniacal au niveau du bassin anaérobie.

Annexe 5 : Résultats de l'analyse des variances des nitrates au niveau du bassin anaérobie.

Annexe 6 : Résultats de l'analyse des variances des orthophosphates au niveau du bassin anaérobie.

Annexe 7 : Résultats de l'analyse des variances de la DBO₅ au niveau du bassin de maturation.

Annexe 8 : Résultats de l'analyse des variances de la DCO au niveau du bassin de maturation.

Annexe 9 : Résultats de l'analyse des variances des matières en suspension (MES) au niveau du bassin de maturation.

Annexe 10 : Résultats de l'analyse des variances de l'azote ammoniacal au niveau du bassin de maturation.

Annexe 11 : Résultats de l'analyse des variances des nitrates au niveau du bassin de maturation.

Annexe 12 : Résultats de l'analyse des variances des orthophosphates au niveau du bassin de maturation.

Annexe 13 : Vue du point de prélèvement d'échantillons de colonne au niveau du bassin anaérobie

Annexe 14 : Vue du point de prélèvement d'échantillons de colonne au niveau du bassin de maturation

Annexe 1 : Résultats de l'analyse des variances de la DBO₅ au niveau du bassin anaérobie.

Tests de comparaisons multiples pour la variable DBO₅ :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C22 ~ C10	17,143	0,724	2,759	0,887	Non
C22 ~ EC	14,286	0,603	2,759	0,930	Non
C22 ~ C16	5,714	0,241	2,759	0,995	Non
C16 ~ C10	11,429	0,483	2,759	0,962	Non
C16 ~ EC	8,571	0,362	2,759	0,983	Non
EC ~ C10	2,857	0,121	2,759	0,999	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,901

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C22	140,000	A
C16	134,286	A
EC	125,714	A
C10	122,857	A

Annexe 2 : Résultats de l'analyse des variances de la DCO au niveau du bassin anaérobie.

Tests de comparaisons multiples pour la variable DCO :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C10 ~ EC	7,600	0,512	2,693	0,956	Non
C10 ~ C16	7,400	0,499	2,693	0,959	Non
C10 ~ C22	6,800	0,458	2,693	0,968	Non
C22 ~ EC	0,800	0,054	2,693	1,000	Non
C22 ~ C16	0,600	0,040	2,693	1,000	Non
C16 ~ EC	0,200	0,013	2,693	1,000	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,809

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C10	274,400	A
C22	267,600	A
C16	267,000	A
EC	266,800	A

Annexe 3 : Résultats de l'analyse des variances des MES au niveau du bassin anaérobie.

Tests de comparaisons multiples pour la variable MES :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C16 ~ C22	13,000	0,828	2,730	0,841	Non
C16 ~ EC	10,125	0,645	2,730	0,917	Non
C16 ~ C10	6,500	0,414	2,730	0,976	Non
C10 ~ C22	6,500	0,414	2,730	0,976	Non
C10 ~ EC	3,625	0,231	2,730	0,996	Non
EC ~ C22	2,875	0,183	2,730	0,998	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,861

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C16	91,875	A
C10	85,375	A
EC	81,750	A
C22	78,875	A

Annexe 4 : Résultats de l'analyse des variances de l'azote ammoniacal au niveau du bassin anaérobie.

Tests de comparaisons multiples pour la variable azote ammoniacal :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 % :

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C16 ~ C10	0,870	0,493	2,693	0,960	Non
C16 ~ C22	0,590	0,334	2,693	0,987	Non
C16 ~ EC	0,580	0,329	2,693	0,988	Non
EC ~ C10	0,290	0,164	2,693	0,998	Non
EC ~ C22	0,010	0,006	2,693	1,000	Non
C22 ~ C10	0,280	0,159	2,693	0,999	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,809

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C16	38,010	A
EC	37,430	A
C22	37,420	A
C10	37,140	A

Annexe 5 : Résultats de l'analyse des variances des nitrates au niveau du bassin anaérobie.

Tests de comparaisons multiples pour la variable nitrates :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C22 ~ EC	0,010	0,033	2,693	1,000	Non
C22 ~ C10	0,010	0,033	2,693	1,000	Non
C22 ~ C16	0,000	0,000	2,693	1,000	Non
C16 ~ EC	0,010	0,033	2,693	1,000	Non
C16 ~ C10	0,010	0,033	2,693	1,000	Non
C10 ~ EC	0,000	0,000	2,693	1,000	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,809

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C22	2,130	A
C16	2,130	A
C10	2,120	A
EC	2,120	A

Annexe 6 : Résultats de l'analyse des variances des orthophosphates au niveau du bassin anaérobie.

Tests de comparaisons multiples pour la variable orthophosphates :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C22 ~ EC	0,367	1,728	2,709	0,326	Non
C22 ~ C16	0,167	0,786	2,709	0,860	Non
C22 ~ C10	0,144	0,681	2,709	0,904	Non
C10 ~ EC	0,222	1,047	2,709	0,723	Non
C10 ~ C16	0,022	0,105	2,709	1,000	Non
C16 ~ EC	0,200	0,943	2,709	0,782	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,832

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C22	5,600	A
C10	5,456	A
C16	5,433	A
EC	5,233	A

Annexe 7 : Résultats de l'analyse des variances de la DBO₅ au niveau du bassin de maturation.

Tests de comparaisons multiples pour la variable DBO₅ :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C10 ~ EC	2,857	0,465	2,759	0,966	Non
C10 ~ C22	2,857	0,465	2,759	0,966	Non
C10 ~ C16	1,429	0,232	2,759	0,995	Non
C16 ~ EC	1,429	0,232	2,759	0,995	Non
C16 ~ C22	1,429	0,232	2,759	0,995	Non
C22 ~ EC	0,000	0,000	2,759	1,000	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,901

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C10	20,000	A
C16	18,571	A
C22	17,143	A
EC	17,143	A

Annexe 8 : Résultats de l'analyse des variances de la DCO au niveau du bassin de maturation.

Tests de comparaisons multiples pour la variable DCO :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C10 ~ C22	2,100	0,156	2,693	0,999	Non
C10 ~ EC	1,500	0,111	2,693	0,999	Non
C10 ~ C16	0,100	0,007	2,693	1,000	Non
C16 ~ C22	2,000	0,149	2,693	0,999	Non
C16 ~ EC	1,400	0,104	2,693	1,000	Non
EC ~ C22	0,600	0,045	2,693	1,000	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,809

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C10	91,500	A
C16	91,400	A
EC	90,000	A
C22	89,400	A

Annexe 9 : Résultats de l'analyse des variances des matières en suspension (MES) au niveau du bassin de maturation.

Tests de comparaisons multiples pour la variable MES :						
Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %						
Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif	
C16 ~ C22	11,625	0,908	2,730	0,801	Non	
C16 ~ EC	8,625	0,674	2,730	0,906	Non	
C16 ~ C10	7,125	0,557	2,730	0,944	Non	
C10 ~ C22	4,500	0,352	2,730	0,985	Non	
C10 ~ EC	1,500	0,117	2,730	0,999	Non	
EC ~ C22	3,000	0,234	2,730	0,995	Non	
Valeur critique du d de Tukey : 3,861						
Classement et regroupements des groupes non significativement différents :						
Modalités	Moyenne	Regroupements				
C16	82,125	A				
C10	75,000	A				
EC	73,500	A				
C22	70,500	A				

Annexe 10 : Résultats de l'analyse des variances de l'azote ammoniacal au niveau du bassin de maturation.

Tests de comparaisons multiples pour la variable azote ammoniacal :						
Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 %						
Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif	
C10 ~ C22	0,230	0,131	2,693	0,999	Non	
C10 ~ EC	0,060	0,034	2,693	1,000	Non	
C10 ~ C16	0,040	0,023	2,693	1,000	Non	
C16 ~ C22	0,190	0,108	2,693	1,000	Non	
C16 ~ EC	0,020	0,011	2,693	1,000	Non	
EC ~ C22	0,170	0,097	2,693	1,000	Non	
Valeur critique du d de Tukey : 3,809						
Classement et regroupements des groupes non significativement différents :						
Modalités	Moyenne	Regroupements				
C10	17,280	A				
C16	17,240	A				
EC	17,220	A				
C22	17,050	A				

Annexe 11 : Résultats de l'analyse des variances des nitrates au niveau du bassin de maturation.

Tests de comparaisons multiples pour la variable nitrates :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 % :

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C22 ~ C10	0,020	0,146	2,693	0,999	Non
C22 ~ C16	0,020	0,146	2,693	0,999	Non
C22 ~ EC	0,000	0,000	2,693	1,000	Non
EC ~ C10	0,020	0,146	2,693	0,999	Non
EC ~ C16	0,020	0,146	2,693	0,999	Non
C16 ~ C10	0,000	0,000	2,693	1,000	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,809

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C22	1,360	A
EC	1,360	A
C16	1,340	A
C10	1,340	A

Annexe 12 : Résultats de l'analyse des variances des orthophosphates au niveau du bassin de maturation.

Tests de comparaisons multiples pour la variable orthophosphates :

Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95,00 % :

Modalités	Différence	Différence réduite	Valeur critique	Pr. > Diff	Significatif
C10 ~ C16	0,278	0,916	2,709	0,796	Non
C10 ~ C22	0,244	0,806	2,709	0,851	Non
C10 ~ EC	0,200	0,660	2,709	0,911	Non
EC ~ C16	0,078	0,257	2,709	0,994	Non
EC ~ C22	0,044	0,147	2,709	0,999	Non
C22 ~ C16	0,033	0,110	2,709	1,000	Non

Valeur critique du d de Tukey : 3,832

Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

Modalités	Moyenne	Regroupements
C10	4,811	A
EC	4,611	A
C22	4,567	A
C16	4,533	A



Annexe 13 : Vue du point de prélèvement d'échantillons de colonne au niveau du bassin anaérobie



Annexe 14 : Vue du point de prélèvement d'échantillons de colonne au niveau du bassin de maturation



Annexe 15 : Séance de prélèvement d'échantillons au « water column sampler ».