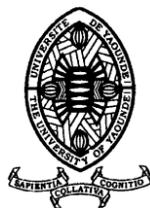


UNIVERSITE DE YAOUNDE I

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

FACULTY OF SCIENCE



DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET DE PHYSIOLOGIE VEGETALE

DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

**EVALUATION DE LA GESTION DES DECHETS
LIQUIDES HOSPITALIERS : CAS DES EAUX USEES DU
CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE DE YAOUNDE**

**Mémoire présenté et soutenu en vue d'obtention d'un Master Professionnel
en Sciences de l'Environnement**

Options : Assainissement et Restauration de l'Environnement

Par:

MBOG MBOG Séverin

Licencié ès Sciences

Matricule : 07S131

Sous l'encadrement de :

MANGA Blaise

Sous-Directeur de DPS

(MINSANTE)

et

la direction de :

Pr. DJOCGOUE Pierre François

Année-Académique 2012-2013

A travers ces lignes je dédie ce modeste travail à:

Ma mère ABEMNUI ASABA Grace

Mon père MBOG Jean et ma tante ASABA Loveline

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail a été possible grâce aux enseignements reçus du Département de Biologie et Physiologie Végétales, au soutien du Laboratoire des Biotechnologies Végétales et Environnement de l'Université de Yaoundé I, ainsi qu'aux différents conseils des parents, amis et camarades. Ce travail est une occasion pour moi de leur témoigner de ma reconnaissance. Qu'il me soit permis de remercier les personnes ci-après:

- Pr. BELL Joseph Martin, Chef du Département de Biologie et Physiologie Végétales pour les enseignements dispensés et pour sa rigueur scientifique ;
- Pr. DJOCGOUE Pierre François, Encadreur de cette étude qui malgré toutes ses occupations, a accepté de diriger ce travail. Sa disponibilité, sa rigueur scientifique, ses conseils et ses supports didactiques m'ont permis de mener ce travail à son terme. Je ne le remercierai jamais assez pour toute la patience et la sollicitude dont il a fait montre ;
- Dr. KENGNE NOUMSI Ives Magloire qui a accepté de suivre ce travail.
- Dr. Evrard Marcel NGUIDJOE et Mr. BOMBA Laurent, superviseur du mémoire, et grâce à qui ce travail a pris corps et âme; trouvez ici ma gratitude et ma reconnaissance à jamais.
- A tous les Enseignants du Département de Biologie et Physiologie Végétales de l'Université de Yaoundé I pour leur encadrement remarquable ;
- M. SOH KENGNE Ebenezer, du Laboratoire de Phyto-épuration du Département de Biologie et Physiologie Végétales pour ses conseils et sa disponibilité qui ont été déterminants pour la réalisation de ce travail ;
- M. LETAH Wilfried, WANDA Christian et DJUMYOM Valery du Laboratoire des Biotechnologies Végétales et Environnement de l'Université de Yaoundé I pour leur disponibilité et leurs conseils ;
- M. MANI et son épouse Asaba Rose dont l'aide, le soutien matériel et moral ont été très importants. Qu'ils trouvent en ce travail un motif de satisfaction ;
- Aux familles ASABA, MBOG, NYOBE, MANI, pour le soutien tant moral que matériel. Trouvez en ce travail l'expression de ma profonde gratitude;
- Mes camarades de la dixième promotion de la Filière Science de l'Environnement, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour tout ce qu'ils ont fait pour moi en particulier OYEBE Belinga, BIDIAS Jacob, TCHATCHOUA Paul, WAMBA Julbert, ZIEGAIN Pierre Apôtre, AMOUGOU BETE, MOTA Brice, KWEDI EBOA Julien, ASABA MBOG Armand, NGUEMEDJI Moussa , Thompson NOLANGUE, FANTA

Sylvie, MBALLA Marcelle, NDI Patricia, KENGNE F. Joséphine,, pour leurs soutiens et leurs conseils;

Je pense particulièrement à mon oncle Mr. Pascal LEMOULA, Mr MANGA Blaise et aussi Mr GADJI DJIDERE dont les conseils m'ont été d'un grand apport, tout le personnel de la Direction de la Promotion de la Santé (DPS) du Ministère de la Santé Publique.

TABLES DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLES DES MATIERES.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES ANNEXES.....	vii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	viii
RESUME	ix
ABSTRACT.....	x
CHAPITRE I. GENERALITES.....	1
I.1. INTRODUCTION.....	1
I.2.REVUE DE LA LITTERATURE.....	2
I.2.1. Généralités sur la pollution.....	2
I.2.2 Eaux usées.....	3
I.2.2.1 Origine.....	3
I.2.2.2 Types d’eaux usées.....	3
I.2.2.3. Législation sur les eaux usées.....	6
I.2.2.4. Paramètres de caractérisation des eaux usées.....	7
I.2.2.5. Conséquences des eaux usées sur l’environnement physique et humain.....	11
I.2.3. Différents procédés de traitement des eaux usées	13

I.2.4. Normes et réglementations.....	23
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES.....	24
II.1. Présentation du site de l'étude.....	24
II.2. Méthodes.....	26
II.2.1. Diagnostic de l'état de la station d'épuration	26
II.2.1.1 Etudes de terrain.....	26
II.2.1.2. Techniques d'enquêtes	26
II.2.2. Evaluation de l'efficacité du système actuel dans le traitement des eaux usées du CHU.....	26
II.2.3. Système proposé pour un traitement des eaux usées du CHU.....	27
II.2.4. Analyses de laboratoire.....	28
II.2.4.1. Analyse physico-chimique.....	29
II.2.4.2. Analyses bactériologique des eaux usées.....	31
II.3. Taux d'abattement des paramètres et rendement du système de traitement.....	31
II.4. Analyses statistiques.....	32
II.5. Analyse économique.....	32
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION.....	33
III.1. RESULTATS.....	33
III.1.1. Diagnostic de l'état de la station d'épuration en matière de gestion des eaux usées.....	33
III.1.1.1. Paramètres organoleptiques.....	33
III. 1.1.2. Nature des équipements d'assainissement de la STEP.....	33
III.1.1.3. Etat actuel des équipements d'assainissement au CHU.....	34

III.1.2. Evaluation de l'efficacité du traitement des eaux usées de la station d'épuration actuelle du CHU.....	36
III.1.2.1 Caractéristiques physico-chimiques.....	36
III.1.2.2 Caractéristiques bactériologiques.....	37
III.1.3. Système proposé pour un traitement des eaux usées du CHU.....	37
III.1.3.1. Paramètres physico-chimiques.....	37
III.1.3.2. Paramètres bactériologiques.....	42
III.1.4. Performance épuratoire de la station d'épuration expérimentale des eaux usées du CHU.....	43
III.1.4.1. Performances physico-chimiques.....	43
III.1.4.2. Performances bactériologiques.....	44
III.1.5. Analyse économique.....	46
III.2. DISCUSSION.....	48
CHAPITRE IV. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	51
IV.1 Conclusion	51
IV.2. Recommandations.....	52
IV.3. Perspectives.....	52
BIBLIOGRAPHIE.....	53
ANNEXE.....	57

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. Filtre planté à écoulement vertical.....	17
Fig.2. Fonctionnement du lagunage naturel.....	19
Fig.3. Vue d'ensemble de la station d'épuration du CHU.....	24
Fig.4. Localisation du site d'étude.....	25
Fig.5. Vue d'ensemble du site d'étude.....	26
Fig.6. Système hybride: (b) Filtre planté de roseaux combiné au (a) lagunage naturel.....	27
Fig.7. Etat de la STEP du CHU de Yaoundé I (a-Couleur des eaux usées; b-Ecume formée).....	
Fig. 8. Vue de la station d'épuration du C.H.U (a-Eaux usées stagnante dans le bassin d'aération; b-Eaux usées se déversant dans la nature).....	39
Fig. 9. Evolution des paramètres physiques dans les différentes étapes du système de traitement dans le système de traitement.....	40
Fig.10. Paramètres physico-chimiques le long du système de traitement des eaux usées.....	41
Fig.11. paramètres physico-chimiques du système de traitement des eaux usées.....	42
Fig.12. Teneurs des coliformes et des streptocoques fécaux dans les eaux usées le long du système hybride	42
Fig.13. Performances épuratoires physico-chimique de la station expérimentale.....	44
Fig.14. Performances épuratoires bactériologique de la station expérimentale.....	45
Fig.15Système hybride combinant les filtres plantés de roseaux au lagunage proposé pour l'épuration des eaux usées	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Composition chimique moyenne d'une eau usée domestique.....	4
Tableau II. Niveau moyen de contamination des effluents urbains par les bactéries.....	11

Tableau III. Caractéristiques du substrat utilisé dans les bacs expérimentaux.....	28
Tableau IV. Caractéristiques physico-chimiques	37
Tableau V. Concentration des paramètres bactériologiques des eaux usées.....	38
Tableau VI. Caractéristiques physico-chimique des eaux usées	38
Tableau VII. Variation des paramètres physico-chimiques en fonction du temps.....	39
Tableau VIII. Paramètres micro-biologiques des eaux usées du C.H.U de Yaoundé.....	42
Tableau IX. Taux d'abattement des paramètres physico-chimiques et bactériologiques.....	45
Tableaux. Estimation du coût de traitement des eaux usées du C.H.U par les boues activées.....	46
Tableau XI. Estimation du coût de traitement des eaux usées du C.H.U par le filtre planté de rose combiné au lagunage naturel.....	47

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Normes de Rejet pour le MINEPDED.....	57
Annexe 2. Evolution de la qualité physique de l'eau le long du système hybride. a. échantillons d'eau prélevés à l'entrée-sortie ; b. analyse des échantillons d'eaux au laboratoire.....	57
Annexe 3. Composition des effluents de différents services hospitaliers et les risques associés.....	58
Annexe 4. Composition des eaux résiduaires en fonction du type d'industrie.....	61
Annexe 5. Quelques germes pathogènes liés aux eaux usées et les maladies qu'ils engendrent.....	62
Annexe 6. Effets de certaines substances toxiques susceptibles de se retrouver dans les eaux usées sur l'homme.....	63
Annexe 7. Fonctions de coût de traitement d'eaux usées urbaines.....	63
Annexe 8. Résumé des appareils et des méthodes utilisées pour la caractérisation physico-chimique et bactériologique des percolats.....	64

Annexe 9. Analyse comparative de différentes technologies de traitements des déchets liquides.....	64
Annexe 10. Proposition de système de traitement par type de formation sanitaire.....	65

LISTE DES ABREVIATIONS

C.H.U: Centre Hospitalier et Universitaire.

CCLIN Paris Nord: Centre de Coordination de la Lutte contre les Infections Nosocomiales.

CDE: Camerounaise Des Eaux

CF: Coliformes fécaux

Cnd: Conductivité

DBO₅: Demande Biochimique en Oxygène pendant 5 jours

DCO: Demande Chimique en Oxygène

E.N.S.P: Ecole Nationale Supérieure Polytechnique.

F.M.S.B: Faculté de Médecine et des Sciences Biomédicales.

FAU: Formazin Attenuated Units

GPS: Global Positioning System

MES: Matière En Suspension

MINEPDED: Ministère de l'Environnement, de Protection de la Nature et Développement Durable.

Nm: Nanomètre

O.M.S: Organisation Mondiale de la Santé.

SF: Streptocoques fécaux

STEP: Station d'épuration

TDS: Solides Totaux Dissous

UFC : Unités formant colonies

RESUME

L'objectif général de ce travail est d'évaluer l'efficacité du système de gestion des eaux usées du Centre Hospitalier et Universitaire (C.H.U) de Yaoundé.

Des essais ont été conduits de décembre 2012 à mars 2013 à l'échelle d'une station pilote construite à l'ancienne station de traitement des eaux usées de CHU de l'Université de Yaoundé I aujourd'hui à l'abandon dans le but d'étudier l'efficacité du traitement de deux systèmes naturels de traitement des eaux usées en série constitué d'une série de filtre planté et de lagunage. Deux charges hydrauliques, respectivement 3 l/j et 5 l/j ont été testé avec chacune une répétition. Tandis que pour le système de lagunage, deux temps de rétention ont été étudiés. Les eaux usées ont été prélevées dans les différents compartiments du système, conservées en glacière réfrigérées et ramenées en laboratoire pour le suivi des paramètres physicochimiques et bactériologiques suivant les protocoles standards.

Les résultats obtenus montrent que les eaux usées non traitées issues du CHU (entrée du système) présentent des fortes teneurs en pollution physicochimique (CND, MES, NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , DCO et DBO₅) et bactériologique (CF et SF). Les performances épuratoires obtenues après la mise en place d'une station pilote a permis de montrer un taux d'abattement des paramètres de la pollution sus énumérés.

Les eaux usées non traitées du CHU présentent un risque environnemental et sanitaire en raison des concentrations élevées en polluants physicochimiques et bactériologiques. Ce système est efficace en raison des abattements obtenus, mais certains paramètres de pollution aux sorties (DBO₅ et DCO) sont supérieures aux normes de rejet du MINEPDED. Un traitement supplémentaire s'impose pour un affinage du traitement garantissant une sécurité environnementale et sanitaire.

Mots clés. Eaux usées, station d'épuration, performances, CHU.

ABSTRACT

The overall objective of this study was to evaluate efficiency of wastewater management of wastewater and of the Yaounde University Hospital Centre (UHC).

Tests were conducted from December 2012 to March 2013 at the scale of a pilot plant built the old treatment plant wastewater Hospital of the University of Yaounde I now abandoned in order to study the effectiveness of two natural treatment systems sewage treatment series consists of a series of planted filter and lagoons. Two hydraulic loads, respectively 3 l / d and 5 l / d have been tested with each repetition. While for the lagoon system, two retention time were studied. The wastewater was collected in the different compartments of the system, kept chilled in ice and brought back to the laboratory for monitoring bacteriological and physicochemical parameters according to standard protocols.

The results show that untreated sewage from the UHC (entry system) has high levelsof physical and chemical pollution (CND, MY, NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , COD and BOD5) and bacteriological (CF and SF) pollution. The purification results obtained after the implementation of a pilot plant has shown a reduction of the parameters of the above elucidated pollution rates.

The untreated sewage UHC present an environmental and health risk due to high physicochemical and bacteriological pollutants concentrations. This system is efficient because of reductions achieved, but some pollution parameter to the outputs (DBO_5 and DCO) are greater than the discharge standards of MINEPDED. An additional treatment is required for refining treatment and ensuring environmental safety.

Keywords. Wastewater, treatment system, performances, CHU.

CHAPITRE I. GENERALITES

I.1.Introduction

Le traitement des eaux usées avant leur rejet dans la nature représente une difficulté majeure pour bon nombre de pays dans le monde. Cette difficulté est plus accentuée dans les pays en voie de développement qui non seulement souffrent d'un manque de capitaux, mais sont confrontés à une urbanisation et à une industrialisation anarchiques. En Afrique, la situation d'évacuation et de traitement des eaux usées est dramatique. La plupart des réseaux d'évacuation d'eaux usées raccordés à des stations d'épurations mécanisées mis en place au lendemain des indépendances sont aujourd'hui non fonctionnels et les eaux usées brutes produites sont évacuées vers les bas-fonds (Kengne, 2000; Kone et *al.*, 2002). Pourtant, bon nombre d'études font ressortir les conséquences négatives du mauvais assainissement, tant sur le plan sanitaire, environnemental qu'économique. Chevalier (2002) mentionne que des centaines de millions de personnes dans le monde souffrent de la schistosomiase, du choléra, de la fièvre typhoïde, de vers responsables de divers troubles de santé et d'autres maladies infectieuses. En plus 3,5 millions d'enfants meurent chaque année de suite de diarrhée, à cause de la précarité des conditions sanitaires. Selon Morel (2002) 51% des pays d'Afrique connaissent une pollution sévère de l'environnement qui risque de porter atteinte aux ressources en eau.

Ces conséquences peuvent être accentuées lorsque l'on a à faire à des déchets dits spéciaux à l'instar des eaux usées provenant des formations hospitalières. En effet, en plus de la composition d'une eau usée domestique, les eaux issues des formations sanitaires sont plus riches en détergents, en produits chimiques et surtout en germes pathogènes et en parasites (Anonyme, 2002).

Malgré les rapports faits par Morel, Chevalier, Koné et bien d'autres, très peu ou presque qu'aucune action n'est entreprise pour remédier à cette situation.

Au Cameroun, la plupart des eaux usées des agglomérations et des structures industrielles sont aujourd'hui rejetées dans le milieu naturel sans un traitement préalable. En effet, la quasi-totalité des stations d'épuration est depuis plus d'une décennie en panne, surchargée ou abandonnée.

La nouvelle loi portant régime de l'eau stipule dans son article 4 que: «sont interdits les déversements, écoulements, jets, infiltrations, enfouissements, épandages, dépôts directs ou indirects dans les eaux de toute matière solide, liquide ou gazeuse et en particulier les déchets

industriels, agricoles et atomiques susceptibles d'altérer la qualité des eaux de surface ou souterraines, ou des eaux de la mer dans les limites territoriales; de porter atteinte à la santé publique ainsi qu'à la faune et à la flore aquatique ou sous-marine; de mettre en cause le développement économique et touristique des régions»(Anonyme, 2000).

Ainsi, toutes les structures telles que les formations hospitalières sont particulièrement interpellées à traiter les déchets liquides avant leur rejet dans le milieu récepteur.

Le Centre Hospitalier et Universitaire (C.H.U) de Yaoundé est l'un des plus grands établissements hospitaliers du pays. Malheureusement, la station d'épuration prévue pour le traitement de ses effluents a cessé de fonctionner depuis fort longtemps. Ceci entraîne d'énormes problèmes sanitaires et environnementaux d'autant plus importants que cette formation hospitalière est située en plein centre urbain et que ses eaux se déversent dans une série d'étangs destinés dont les eaux servent à la pisciculture et de lieude pêche. Face à cette situation, il est impératif que des actions soient entreprises afin d'améliorer la qualité des eaux rejetées par cette institution (Tchinda, 2000).

Le présent travail inscrit dans ce cadre a pour objectif général d'évaluer efficacité du système de gestion des eaux usées du C.H.U de Yaoundé.

Plus spécifiquement, il vise à:

- faire un diagnostic de l'état du lieu en matière de gestion des eaux usées du CHU;
- évaluer l'efficacité du système existant dans le traitement des eaux usées;
- proposer un système mieux adapté au traitement des eaux usées du CHU.

Après une revue de la littérature consacrée aux généralités les eaux usées et sur les systèmes d'épuration des eaux usées au chapitre I, le chapitre II suivra avec la présentation du matériel et des méthodes ayant permis de réaliser ce travail. Le troisième chapitre est centré sur la présentation et la discussion des résultats obtenus. Une conclusion, des recommandations et des perspectives font l'objet du quatrième chapitre.

I.2. Revue de la littérature

I.2.1. Généralités sur la pollution

La révolution industrielle, avec le prodigieux développement des activités humaines s'est traduite par un accroissement et une diversification des pollutions qui constituent des menaces sérieuses pour l'équilibre futur de la biosphère, de l'hydrosphère, de l'atmosphère et des générations futures de notre espèce. Tout accroissement d'activité, de production, entraîne inévitablement une augmentation des déchets. Si ceux-ci ne sont pas recyclés, détruits ou mis

définitivement hors circuit, des problèmes apparaissent: il ya pollution (Barbault, 1983 cit. Tchinda, 2000).

De façon générale, la pollution est toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles, d'une perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière ou encore de l'introduction d'espèces exotiques dans une biocénose naturelle (Ramade, 2005).

Les déchets qui polluent l'environnement peuvent se présenter à l'état gazeux (produits de combustion, produits volatils, composés chimiques dissipés dans l'air par évaporation), à l'état liquide (eaux usées, eaux pluviales et de ruissellement urbain, eaux de ruissellement des Zones agricoles) ou à l'état solide (ordures ménagères, résidus divers).

La présente étude porte sur les rejets liquides et elle s'intéresse préférentiellement aux eaux usées.

I.2.2.Eaux usées

I.2.2.1. Origine

Une eau est considérée comme «usée» lorsque son état et sa composition sont modifiés par les actions anthropiques, de manière à ce qu'elle soit difficilement utilisable pour tous ou pour certains usages, auxquels elle devrait servir à l'état naturel. De manière générale, une eau usée encore appelée eau résiduaire est une eau qui a subi une détérioration après usage (Djermakoyé, 2005 cit. Ayo, 2013). Suivant l'origine des substances polluantes on distingue quatre catégories d'eaux usées(Habib et El Rhazi, 2007 cit. Letah, 2012).

I.2.2.2.Types d'eaux usées

I.2.2.2.1. Eaux usées domestiques

Elles sont constituées d'une part des eaux vannes encore appelées «eaux noires» issues des toilettes et chargées des matières organiques azotées, de germes fécaux, et d'autre part des eaux grises provenant des ménages (lavabo, lessiveuse, baignoire, ...) et des rejets issus essentiellement des activités ménagères. Les eaux usées domestiques sont porteuses de pollution organique. Elles ont pour origine les WC, les salles de bains, cuisines, et sont généralement chargées en détergents, graisses, solvants, et débris organiques, ... (Cors, 2007 cit.Kengne, 2008). Les eaux usées domestiques sont riches en matières organiques biodégradables.

I.2.2.2.1.1. Composition physico-chimique

La composition chimique moyenne d'une eau usée domestique est présentée au tableau (I).
Tableau I. Composition chimique moyenne d'une eau usée domestique (Afee, 1977 cité par Tchinda, 2000).

Nature (Composants majeurs)	Matières Inorganiques (Azote, Phosphore, Potassium, Calcium)	Matières Organiques (Hydrates de Carbone, Graisses, Matières Protéiques)
Pourcentage	10 à 30%	70 à 90%

D'après ce tableau, les eaux usées domestiques sont très riches en matières organiques (70 à 90%) dont la dégradation par les micro-organismes donne des éléments nutritifs.

I.2.2.2.1.2. Composition microbiologique

Les effluents urbains sont chargés en germes commensaux habituels de l'homme et en germes pathogènes en provenance de porteurs sains et des malades. Parmi ces micro-organismes, on peut citer les virus, les bactéries, les parasites, les champignons et les algues (Bechacet *al.*, 1983).

- les virus sont représentés par les entérovirus dont les plus fréquemment rencontrés sont les polyvirus (virus de la poliomyélite) et les coxsackies A et B. On a aussi les réovirus, les adénovirus, les rotavirus et le virus de l'hépatite infectieuse.
- les bactéries sont les plus représentées; ce sont essentiellement les entérobactéries parmi lesquelles on peut citer les coliformes, les salmonelles, les shigelles, les colibacilles auxquelles il faut ajouter les leptospires et les mycobactéries.
- les parasites sont représentés par les œufs de vers: tænia, ascaris, les kystes d'amibes, de giardia.
- les champignons sont très souvent rencontrés et un exemple classique est *Histoplasma capsulatum* qui infeste les canalisations et peut causer l'histoplasmose.

- parmi les algues souvent présentes dans les eaux usées domestiques; on a les algues vertes (à l'exemple de *Ulothrix*), les algues bleues ou cyanophycées (à l'exemple de *Oxillatoria*).

I.2.2.2.2. Eaux usées industrielles

Les eaux usées industrielles proviennent essentiellement des activités industrielles et varient d'une industrie à l'autre. En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles contiennent très souvent des composés nocifs à l'environnement. En effet, divers métaux lourds (cadmium, zinc, plomb, chrome, mercure), des composés organiques synthétiques ou non difficilement biodégradables et des graisses y sont présents souvent en grande quantité.

Ces eaux peuvent être à caractère minéral dominant comme dans le cas du traitement des minerais, à caractère organique dominant pour les eaux usées issues des industries agroalimentaires, abattoirs, conserveries à caractère toxique pour certaines industries chimiques) ou tout simplement chaudes comme dans les centrales électriques (Bechacet *al.*; Ndiayé, 2005).

I.2.2.2.3. Eaux usées pluviales

Elles sont synonymes des eaux claires collectées dans les réseaux d'assainissement. Elles constituent la cause d'une pollution importante des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. Les eaux pluviales sont chargées d'impuretés et au cours de leur trajet, elles transportent des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds).

I.2.2.2.4. Eaux usées agricoles

L'utilisation en agriculture des engrais chimiques de synthèse (engrais phosphatés et azotés), des pesticides ainsi que les effluents des élevages constituent des sources diffuses de pollution des eaux d'origine agricole à travers les sols (lessivage, percolation, lixiviation). Ces substances chimiques peuvent soit s'infiltrer dans le sol et atteindre la nappe phréatique, soit être lessivées par les eaux de pluie et drainées dans les eaux usées. Les engrais chimiques contiennent certains métaux et métalloïdes à l'état de trace, surtout le cas des superphosphates constituant ainsi une pollution du milieu récepteur.

En dehors des eaux usées domestiques et industrielles, il existe un type particulier d'eaux usées qui mériteraient de par leur composition physico-chimique et microbiologique d'être étudié: il s'agit des eaux usées hospitalières.

I.2.2.2.5. Eaux usées hospitalières

Une structure hospitalière est généralement «traversée par un grand courant d'eau» (Anonyme, 2002). En France, les besoins en eau d'un C.H.U sont estimés à 850 litres d'eau par lit d'hospitalisation et par jour. Ce volume d'eau considérable assure une dilution importante de nombreux effluents des services hospitaliers (Anonyme, 2002). Les eaux usées hospitalières peuvent être considérées comme très proches des eaux usées domestiques de par leur contenu en matières organiques et leurs paramètres physico-chimiques globaux (DCO, DBO, MES, Azote,...), mais elles sont aussi proches des eaux usées industrielles par leur contenu en éléments chimiques et en métaux lourds. Ces eaux ont une biodégradabilité plus faible que celle des eaux usées domestiques et une toxicité plus élevée. En plus, les variations de leurs charges polluantes peuvent être importantes suivant le lieu, l'heure, le jour de prélèvement et le débit (Anonyme, 2002).

La flore microbienne des effluents hospitaliers est comparable à celle des effluents domestiques mais généralement avec de plus faibles concentrations, bien que très hétérogène en fonction de l'heure, du jour de prélèvement et des débits; Ceci est probablement causé par des concentrations plus élevées en désinfectants et antibiotiques. Par contre, les travaux menés à Limoges (Chevalier, 2002) ont mis en évidence des germes de la flore fécale ayant acquis des caractères de résistance aux antibiotiques et même l'existence des souches typiquement hospitalières (Anonyme, 2002).

I.2.2.3. Législation sur les eaux usées

Depuis plusieurs décennies, un intérêt particulier est porté sur les eaux usées dans la majeure partie du monde. En effet la loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006, sur l'eau et les milieux aquatiques, donne les outils à l'administration, aux collectivités territoriales et aux acteurs de l'eau en général, pour reconquérir la qualité des eaux et atteindre en 2015 les objectifs du bon état écologique fixés par la directive cadre européenne (DCE) du 22 décembre 2000 (Cavicchi, 2008). Cette loi est présentée en droit camerounais par la loi n° 96/12 du 05 août 1996 portant loi-cadre relatif à la gestion de l'environnement qui vise à limiter ou à supprimer les rejets dans l'eau et/ou dans l'air des substances toxiques, la production de déchets et l'utilisation de certains produits chimiques.

L'eutrophisation des plans d'eau superficiels (lacs, fleuves, rivières), l'utilisation des eaux usées dans l'agriculture entraînent la pollution et la dégradation de l'environnement.

Face à cette situation, une réflexion approfondie a été menée quant à la gestion des eaux usées, leur traitement par les systèmes d'épuration et leur réutilisation ultérieure. Pour ce faire il est nécessaire de connaître les différentes caractéristiques des eaux usées.

I.2.2.4. Paramètres de caractérisation des eaux usées

Les eaux usées sont caractérisées par la mesure de leurs paramètres physico-chimiques et biologiques dont les valeurs doivent être inférieures ou égales à certains seuils pour le rejet sans grand danger dans la nature.

I.2.2.4.1 Paramètres physico-chimiques

I.2.2.4.1.1. Température

Elle joue un rôle fondamental dans toutes les réactions chimiques qui ont lieu dans un milieu liquide. Les températures $> 15\text{ °C}$ intensifie les odeurs tandis que les températures basses ralentissent la vitesse de certaines réactions chimiques. La vitesse de dégradation de la matière organique dans une eau usée est d'autant plus importante que la température est élevée (Sy et Tall, 2003 cité par Letah, 2012). Son importance se fait surtout sentir, dans la cinétique de l'épuration, par une accélération des processus d'épuration quand le milieu biologique s'y prête.

I.2.2.4.1.2. potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH permet d'exprimer le caractère acide ($\text{pH} < 7$) ou basique ($\text{pH} > 7$). Sa valeur dépend des équilibres ioniques dans l'eau. Le pH a une grande influence sur la répartition des métaux lourds dans l'eau (Fonkouet *et al.*, 2002). Grâce à un pH-mètre les mesures se font *in-situ*. Le pH peut affecter les processus de désinfection, de solubilité des métaux. Des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Le pH influence de nombreuses réactions physico-chimiques et la distribution des microorganismes impliqués dans la dégradation des matières organiques.

I.2.2.4.1.3. Demande Biochimique en Oxygène pendant 5 jours (DBO₅)

Elle exprime la quantité de matières organiques biodégradables présente dans l'eau. Plus précisément, ce paramètre exprimé en mg d'oxygène par litre ($\text{mg O}_2/\text{l}$), mesure la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation des matières organiques grâce aux phénomènes d'oxydation par voie aérobie. Pour mesurer la DBO₅, on prend comme référence la quantité d'oxygène consommée au bout de 5 jours. Le rapport entre la DCO et la DBO₅ constitue une mesure indicative de la « dégradabilité » biochimique des composés présents dans l'eau (De Villers *et al.*, 2005 cit. Letah, 2012).

I.2.2.4.1.4. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La DCO, exprimée en mg d'oxygène par litre représente la teneur totale de l'eau en matières oxydables. Ce paramètre correspond à la quantité d'oxygène qu'il faut fournir pour oxyder par voie chimique ces matières (Ndiayé, 2005). Ainsi, par la mesure de la DCO on peut évaluer la charge polluante d'une eau usée en matières organiques avant et après un traitement physique, chimique ou biologique afin de contrôler l'efficacité du traitement épuratoire (Miss, 2007). De plus, une forte teneur en DCO et MES provoque une diminution de la disponibilité en oxygène du milieu et donc une asphyxie du système. La moyenne trouvée pour la DCO des eaux usées dans diverses villes du monde s'élève environ à 30 g/l (Metcalf et Eddy, 1991; cité par Kengne, 2008).

I.2.2.4.1.5. Matières En Suspension (MES)

Les MES représentent l'ensemble des matières solides, organiques ou minérales contenues dans une eau usée et pouvant être retenues par filtration ou centrifugation. Elles permettent une bonne évaluation du degré de pollution d'une eau. La plus grande partie des microorganismes pathogènes contenus dans les eaux usées, est associée aux MES. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble et, souvent un mauvais goût et une mauvaise odeur (Baumont et *al.*, 2002). Les MES empêchent la pénétration de la lumière, diminuent l'oxygène dissous et représentent une surface d'attache pour les bactéries. On les subdivise en deux catégories:

- les matières décantables qui sont les MVS (matières volatiles sèches) représentant la partie organique des MES. Elles comprennent les particules de biomasse vivante ou morte, qui se déposent pendant un temps fixé conventionnellement à 2 h (Bassompierre, 2007);
- les matières colloïdales qui représentent la différence entre MES et matières décantables (Sy et Tall, 2003).

I.2.2.4.1.6. Conductivité

La conductivité est la mesure de la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. Elle permet d'estimer approximativement le niveau de minéralisation de l'effluent grâce aux relations établies entre la minéralisation et la conductivité. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. La conductivité est également fonction de la température de l'eau: elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats de mesure doivent donc être présentés en termes de conductivité

équivalente à 20 ou 25°C. Elle s'exprime en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (micro Siemens par centimètre). Elle permet d'évaluer l'efficacité épuratoire des stations d'épuration.

I.2.2.4.1.7. Azote et Phosphore

L'azote et le phosphore sont également des paramètres très importants. Les rejets excessifs de phosphore et d'azote contribuent à l'eutrophisation des lacs et des cours d'eau. Ce phénomène se caractérise par la prolifération d'algues et la diminution de l'oxygène dissous, ce qui appauvrit la faune et la flore des eaux superficielles (cours d'eau, lacs, ...). Les concentrations en nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), ammonium (NH_4^+), ammoniac (NH_3), azote (N) orthophosphates (PO_4^{3-}), et phosphore (P) sont dès lors des paramètres importants pour le suivi de la qualité des eaux de surface. L'azote « Kjeldahl » représente l'azote organique (ex. acides aminés, urée) et l'azote ammoniacal. Les phosphates interviennent dans la composition de nombreux détergents. Ils doivent être dégradés et hydrolysés par les bactéries en ortho phosphates pour être assimilables par les autres organismes aquatiques. L'eutrophisation peut se manifester à des concentrations relativement basses en phosphates ($50 \mu\text{g P/l}$) (De Villers et *al.*, 2005).

I.2.2.4.2. Paramètres organoleptiques

Ces paramètres font appel aux organes sensoriels comme matériels d'analyse. Ils sont appréciés au moment du prélèvement des échantillons d'eau. Il s'agit de la couleur, du goût et de l'odeur.

I.2.2.4.2.1. Couleur

Toute eau présente une couleur dite vraie résultant des différentes couleurs des particules qui s'y retrouvent. Toutes fois, du fait d'une concentration anormale de certains éléments dans l'eau suite à une pollution donnée, la couleur de l'eau change et est en ce moment dictée par la coloration de ces éléments polluants. Une telle couleur de l'eau est dite apparente. Elle évalue la quantité de matières solubilisées et de colloïdes tels que les composés chimiques solubles à coloration marquée, les métaux et d'autres déchets (Bechacet *al.*, 1983). Elle est exprimée en unité d'échelle colorimétrique au Platine Cobalt (PtCo).

I.2.2.4.3. Paramètres biologiques

Les paramètres biologiques souvent recherchés lors de la caractérisation des eaux usées sont les bio-indicateurs de la pollution fécale parmi lesquels on a les bactéries, les protozoaires, et les macro-invertébrés. Les eaux usées et les eaux de ruissellement contiennent de nombreux organismes pathogènes, représentant une menace pour la santé humaine et l'écosystème aquatique (Chedad et Assobhei, 2007). Les eaux usées contiennent en moyenne 10^7 à 10^8 bactéries/ml. La concentration en bactéries pathogènes est de l'ordre de $10^4/l$ (Habib et El Rhazi,

2007). L'estimation de la contamination se fait par le biais de bactéries indicatrices de pollution fécale et de germes pathogènes. L'utilisation des microorganismes comme indicateurs de la qualité hygiénique de l'eau date d'avant 1880 (Anonyme, 2000). Ces indicateurs bactériens sont les coliformes fécaux (CF) et les streptocoques fécaux (SF). Il a été montré que les caractéristiques du milieu récepteur peuvent affecter la survie de ces indicateurs (Chedad et Assobhei, 2007 cité par Ayo, 2013).

I.2.2.4.3.1. Bio-indicateurs bactériens

Ce sont les micro-organismes commensaux pathogènes ou non, trouvés dans le tube digestif de l'homme et des animaux à sang chaud. Ils se retrouvent généralement dans les milieux aquatiques pourvus de matière organique. Le choix de ces germes comme bio-indicateurs de la pollution repose sur leur origine, leur sensibilité à différents niveaux de pollution et leur aptitude à dégrader la matière organique en substances minérales en vue de son recyclage. On distingue deux principaux groupes de bio-indicateurs: coliformes fécaux et streptocoques fécaux.

I.2.2.4.3.1.1. Coliformes fécaux (CF)

Les coliformes fécaux, ou coliformes thermotolérants, sont des germes témoins de contamination fécale communément utilisés pour contrôler la qualité relative d'une eau. Ils constituent un sous-groupe des coliformes totaux capables de fermenter le lactose à une température de 44,5 °C. Ils sont aussi de bons indicateurs de l'efficacité du traitement de l'eau (Chevalier, 2002). L'intérêt de la détection de ces coliformes, à titre d'organismes indicateurs réside dans le fait que leur survie dans l'environnement est généralement équivalente à celle des bactéries pathogènes. De plus leur densité est généralement proportionnelle au degré de pollution produite par les matières fécales (Chevalier, 2002).

I.2.2.4.3.1.2. Streptocoques fécaux (SF)

Les streptocoques fécaux sont présents dans les intestins d'environ 75 % des humains, à des concentrations variant de 10^5 à 10^8 bactéries/g (Chevalier et al., 2002). La persistance des entérocoques dans divers types d'eau peut être supérieure à celle des autres organismes indicateurs de pollution, notamment à cause de leur résistance notoire aux agents désinfectants. C'est ce qui fait d'eux des indicateurs privilégiés pour évaluer l'efficacité du traitement de l'eau (Anonyme, 2000). Cet intérêt à l'égard des entérocoques s'expliquerait par le fait que, comparativement aux coliformes (incluant *Escherichia coli*), ils sont plus résistants à des

conditions environnementales difficiles et persistent plus longtemps dans l'eau (Chevalieret *al.*, 2002).

Le niveau moyen de contamination des effluents urbains par les bactéries sont présentés dans le tableau II.

Tableau II. Niveau moyen de contamination des effluents urbains par les bactéries (Bechac et *al.*, 1983)

Niveau moyen de Contamination Germes	Valeur moyen (/ 100 ml)
Coliformes totaux	180×10^6
Coliformes fécaux	40×10^6
Streptocoques fécaux	4×10^6
Salmonelles	10^2
Particules virales	10^3

I.2.2.4.3.2. Protozoaires bio-indicateurs

Les protozoaires jouent un rôle important dans la destruction de la matière organique d'où leur forte présence dans les zones de dégradation et de décomposition actives. On peut citer les ciliés (glaucina, pénicillium), les flagellés et quelques espèces sessiles à régime bactériophage.

I.2.2.4.3.3. Macro-invertébrés

Certaines eaux usées sont susceptibles de contenir une multitude de micro-organismes, certains pathogènes peuvent être recherchés pour évaluer les dangers que présentent ces effluents pour l'environnement. Parmi ces pathogènes, on a les salmonelles, les shigelles, *Escherichia coli*, les vibrions cholériques, les citrobactéries et certains virus. Toutes ces formes de pollution entraînent une forte dégradation des milieux récepteurs aux conséquences d'ordre sanitaire, écologique, et économique.

I.2.2.5. Conséquences des eaux usées sur l'environnement physique et humain

Toutes formes de pollution entraînent une forte dégradation des milieux aquatiques récepteurs aux conséquences diverses à savoir: sanitaires, écologiques et économiques (Agendia et *al.*, 2000).

I.2.2.5.1. Conséquence d'ordre sanitaire

En plus des conséquences environnementales (eutrophisation, propagation des mauvaises odeurs) causées par les décharges anarchiques des eaux usées dans la nature, on note des conséquences sanitaires qui ont des effets dramatiques spécialement dans les pays en développement qui manquent des systèmes adéquats de traitement des excréta ou des eaux usées contaminées. Cependant, l'utilisation des eaux usées brutes a été montrée, comme une source potentielle de contaminations microbiologiques et chimiques des nappes d'eaux souterraines et superficielles (Howard et *al.* 2003; Taylor, 2004). La consommation des eaux de la nappe contaminée par les eaux usées, a pour conséquence le développement des maladies hydriques. Gaye et Niang (2002) ont attribué les épidémies de typhoïde, de paratyphoïde et de choléra qui ont éclaté à Dakar au Sénégal aux eaux usées. De même les études récentes réalisées à Kampala en Ouganda ont mis en évidence la relation entre l'épidémie de cholera de 1997-1998 et la contamination des puits (Howard et *al.*, 2003). La contamination peut se faire par contact lors des baignades, par la consommation des produits alimentaires aquatiques tels que les poissons ou alors les légumes arrosés avec de l'eau souillée pendant leur culture. Elle peut aussi être chimique et se faire par la piqûre des insectes se développant dans les eaux usées et par la consommation au travers des sources et des puits d'eau de la nappe phréatique souillée par des eaux usées.

En plus des germes pathogènes, les eaux usées en fonction de leurs origines peuvent contenir des substances toxiques capables d'engendrer de graves troubles de santé chez l'homme.

I.2.2.5.2. Conséquence d'ordre écologique

La décharge des eaux usées non traitées dans l'environnement peut entraîner d'énormes modifications de l'écosystème qui les reçoit (Agendia et *al.*, 2000). On peut citer entre autres:

- la diminution de la biodiversité aquatique à cause de la toxicité du milieu et l'apparition des espèces nouvelles;
- l'eutrophisation des milieux aquatiques récepteurs;
- la dégradation de l'esthétique du milieu par la propagation des mauvaises odeurs;
- la perturbation du microclimat du milieu récepteur.

I.2.2.5.4.3 Conséquence d'ordre économique

Le manque d'assainissement entraîne sur le plan économique un manque à gagner important:

- l'eutrophisation et la toxicité des étangs destinés à la pisciculture entraînent d'énormes pertes pour les promoteurs des projets dans ce domaine;
- une masse financière importante est dépensée pour traiter les maladies écoulant du manque et du mauvais assainissement, puis il y a baisse de productivité d'une partie de la population affaiblie par les maladies hydriques;
- la perte de l'esthétique du milieu naturel constitue un frein pour l'industrie touristique locale.

I.2.3. Différents procédés de traitements des eaux usées

Une station d'épuration est une installation de traitement des eaux usées destinée à les rendre propre, à être rejetées sans inconvénients majeurs dans le milieu naturel et rejoindre le cycle de l'eau. Il ne s'agit en aucun cas d'une usine de traitement des eaux naturelles, de surface ou issues d'un captage en vue de leur potabilisation et de leur fourniture aux besoins des hommes. Le principe d'une station d'épuration est de réduire la charge polluante (matière organiques en suspension et en solution, produits chimiques,...) des effluents afin de ramener les paramètres physico-chimiques et biologiques de ces eaux aux normes compatibles avec l'équilibre biologique du milieu récepteur. Il existe un grand nombre de procédés d'épuration des eaux usées dont l'application dépend à la fois des caractéristiques des eaux à traiter et du degré d'épuration désiré (Miss, 2007). Le traitement des eaux usées dans une STEP nécessite 4 phases:

- le prétraitement;
- le traitement primaire;
- le traitement secondaire;
- le traitement tertiaire.

I.2.3.1. Prétraitement

Le prétraitement qui permet de séparer les matières grossières et les éléments susceptibles de gêner les étapes ultérieures du traitement. Il comprend le dégrillage pour retenir les déchets volumineux (refus de dégrillage), le dessablage pour obtenir une meilleure décantation, le

dégraissage et le déshuilage pour éviter l'encrassement de la station par les corps gras (Ndiayé, 2005; Bassompierre, 2007). On distingue les procédés suivants:

I.2.3.1.1. Procédés à barrières

I.2.3.1.1.1. Dégrillage

Il consiste à faire passer l'effluent entre les barreaux d'une grille dont l'écartement se mesure habituellement en centimètres. Il débarrasse l'eau usée des matières les plus volumineuses et soulage le travail de la station d'épuration des points de vue biologique et de protection mécanique de l'ouvrage (Bechac *et al.*, 1983).

I.2.3.1.1.2. Dilacération

Il s'agit de l'opération qui permet de broyer assez finement les résidus de dégrillage pour qu'ils puissent suivre le sort des matières décantables fines.

I.2.3.1.1.3. Tamisage

Le tamisage est un dégrillage poussé, les eaux brutes devant traverser un tamis à mailles + ou - fines. Il permet la récupération de déchets utilisables, évite l'obstruction des canalisations ou des pompes, limite les risques de dépôt et de fermentations, soulage le traitement biologique ultérieur.

I.2.3.1.2. Procédés gravitaires

I.2.3.1.2.1. Dessablage

La technique classique du dessablage consiste à faire circuler l'eau dans une chambre de tranquillisation où il est tenté d'obtenir une vitesse constante quel que soit le débit, pour permettre la décantation des grains grossiers. Il est important d'éliminer les sables présents dans l'effluent pour éviter leur sédimentation ultérieure qui peut amener le bouchage des canalisations et protéger les organes mécaniques en mouvement rapide (axes de chaînes, pompe de relèvement, rotor de centrifugeuses à boues).

I.2.3.1.2.2. Dégraissage-déshuilage

Les appareils statiques utilisés sont les matériels les plus simples qui jouent simplement sur la différence naturelle de densité entre les particules grasses et le milieu. Un ralentissement de l'eau permet leur montée en surface d'où elles sont évacuées. L'élimination des graisses est important pour éviter l'envahissement des décanteurs par des flottants, la diminution de la capacité d'aération des boues activées dans les systèmes à aérateur de surface, la mauvaise sédimentation dans le décanteur secondaire, le bouchage des canalisations et des pompes (Bechac *et al.*, 1983).

I.2.3.2 Traitement primaire

Le traitement primaire qui est un procédé physique et/ou physico-chimique visant à éliminer par décantation une forte proportion de matières organiques ou minérales. A l'issue de ce traitement, la DBO₅ dans l'affluent est réduite d'au moins 20 % et le total des matières solides en suspension d'au moins 50 % avant le rejet (Liénard, 2004). Ce traitement ne permet d'obtenir qu'une épuration partielle des eaux usées. Le traitement primaire peut se faire par des procédés chimiques ou par des procédés physiques.

I.2.3.2.1. Procédés chimiques

Les procédés chimiques généralement utilisés dans le traitement des effluents hospitaliers pour la régulation des débits et du pH sont: la neutralisation, l'égalisation et l'addition de réactifs chimiques et de coagulation (CCLIN Paris-Nord, 2002).

I.2.3.2.1.1. Neutralisation

De nombreux rejets industriels contiennent des composés acides ou alcalins. Ce qui entraîne dans certains cas leur pH hors des limites 6-9. Il est nécessaire de procéder à une neutralisation préalable à la chaux, à l'acide sulfurique ou à la soude sous contrôle d'un pH-mètre (Bechac, 1983).

I.2.3.2.1.2. Egalisation

Elle s'effectue dans des bassins d'égalisation dont le but est de diminuer et contrôler les variations des caractéristiques de l'eau usée en vue de se situer dans des conditions optimum pour les procédés de traitement qui suivent.

I.2.3.2.1.3. Addition de réactifs chimiques et coagulation

Les réactifs de coagulation sont utilisés pour agglomérer les particules à séparer, les alourdir et favoriser ainsi leur séparation par décantation afin d'améliorer les performances de l'ouvrage de traitement ultérieur. Les réactifs de coagulation proprement dits sont: les sels de fer (chlorure ferrique, sulfate ferrique, sulfate de fer chloré), les sels d'alumine (polychlorure d'alumine, sulfate d'aluminium) et la chaux.

I.2.3.2.2. Procédés physiques

I.2.3.2.2.1. Décantation

La décantation est le processus principal du traitement primaire. Elle permet d'éliminer les colloïdes, les matières organiques et minérales sédimentables restant en suspension qui

représentent une proportion importante de la charge en DCO (45% à 80%, 65% en moyenne) et en DBO₅ (30 à 40%).

I.2.3.2.2. Flottation

La flottation permet la séparation des phases de densités voisines. On a la flottation à l'air dissous (aéroflottation) et l'électroflottation (Bechac et *al.*, 1983).

I.2.3.3. Traitement secondaire

Le traitement secondaire correspond généralement au traitement biologique des eaux usées. Il reproduit artificiellement ou non. Ces phénomènes d'auto-épuration existant dans la nature. L'auto-épuration regroupe l'ensemble des processus par lesquels un milieu aquatique parvient à retrouver sa qualité d'origine après une pollution. Les techniques d'épuration biologique utilisent l'activité des bactéries présentes dans l'eau qui dégradent les matières organiques. Ces techniques sont soit anaérobies, c'est-à-dire se déroulant en absence d'oxygène, soit aérobies, c'est-à-dire nécessitant un apport d'oxygène. Parmi les traitements biologiques, on distingue deux groupes de procédés:

- les procédés biologiques extensifs
- les procédés biologiques intensifs

I.2.3.3.1. Procédés biologiques extensifs

Les systèmes extensifs ou écotechniques sont définis comme des « techniques écologiquement rationnelles qui protègent l'environnement, sont moins polluants, utilisent de façon plus durable toutes les ressources, et autorisent le recyclage d'une proportion importante de leurs déchets et produits». Ces systèmes reposent sur les phénomènes naturels d'auto-épuration et ne demandent pas d'énergie mais nécessitent de grandes superficies et de longs temps de séjours des eaux usées. En dehors de leur rôle premier qu'est l'épuration des eaux usées, ces systèmes par leurs qualités paysagères, sont des lieux de récréation et de promenade, des sites de préservation de la biodiversité faunistique et floristique. Ils sont source de production d'aliments et de fibres, grâce aux plantes utilisées pour l'épuration. Ces plantes peuvent être revaloriser dans le fourrage, production du biogaz, du compost, ... (Kengne, 2008 ; Ngoutane et *al.*, 2011). Du point de vue économique, ils sont moins coûteux. Ce sont les lagunages à macrophytes ou à microphytes, les filtres plantés de roseaux, l'infiltration-percolation, l'épandage souterrain.

Le choix de l'un ou l'autre des procédés de traitement dépend de plusieurs considérations: l'origine et le volume d'eau à épurer, les conditions locales (température,

climat), l'emplacement (topographie, nature du sol), les facteurs économiques (coût d'investissement et d'exploitation), les normes à atteindre,... (Kengne, 2008).

Le lagunage est une technique simple et peu coûteuse d'épuration des eaux usées très répandue dans les pays subsahariens. Il consiste en un lent écoulement des eaux à épurer dans un ou plusieurs bassins dont la profondeur varie en fonction du type de lagunage (Kengne, 2000 ; Nya, 2002). L'oxygène est apporté par les échanges avec l'atmosphère au niveau du plan d'eau et par l'activité photosynthétique des micro-algues de surface.

Le système extensif souvent expérimenté pour l'épuration des eaux usées en provenance des hôpitaux est le lagunage (lagunage à microphytes ou lagunage à macrophytes) et voir même si possible les filtres plantés de roseaux.(Frerotte J. et Verstrate W, 1979)

I.2.3.3.1.1. Filtres plantés de roseaux ou lits plantés de macrophytes

I.2.3.3.1.1.1 Typologie et fonctionnement des filtres plantés

Il existe plusieurs variantes de filtres plantés suivant le type d'écoulement des eaux (Anonyme, 2005). On distingue les filtres plantés à écoulement horizontal et les filtres plantés à écoulement vertical. Toutefois dans le cadre du traitement des eaux usées, on utilise exclusivement les filtres plantés à écoulement vertical pour la première partie du système.(Fig. 1)

Le principe de fonctionnement des filtres plantés à écoulement vertical repose sur la percolation des eaux usées à travers un massif filtrant colonisé par des bactéries qui assurent les processus épuratoires. Le système racinaire se développe dans le massif filtrant et crée des pores qui augmentent la conductivité hydraulique du système. L'eau circule préférentiellement dans la direction verticale et l'alimentation des eaux usées se fait de façon intermittente. L'oxygénation est favorisée par la présence de roseaux et le mode d'alimentation par bâchées. Cette oxygénation est favorable à la nitrification et limite également le phénomène de colmatage. Ce mode d'alimentation est nécessaire pour contrôler la croissance de la biomasse épuratoire dans les matériaux de garnissage des massifs filtrants ainsi que les rhizomes et racines de roseaux. (Liénard *et al.*, 2004)

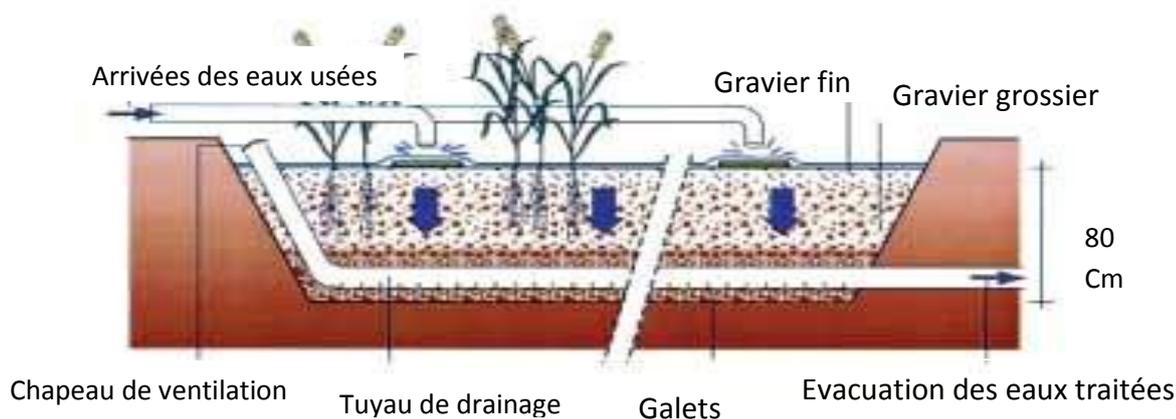


Fig.1.Filtre planté à écoulement vertical.(Liénard ,2004)

I.2.3.3.1.2 Avantages et inconvénients des filtres plantés

Un certain nombre d'avantages militent en faveur du choix de cet éco technologie pour les pays en voie de développement qui souffrent d'un manque de capital et de main d'œuvre qualifiée (Anonyme, 2005). Parmi ces avantages, reviennent notamment:

- une bonne intégration paysagère;
- une bonne qualité de l'eau traitée par rapport au lagunage;
- une importante élimination de l'azote par nitrification;
- un maintien de la perméabilité par les roseaux;
- une atténuation des odeurs;
- des faibles coûts d'exploitation et d'entretien par rapport aux systèmes conventionnels d'épuration (boues activées, lits bactériens).

Parmi les inconvénients, on distingue:

- un faucardage (récolte de la biomasse) annuel et pluriannuel;
- les coûts d'installation plus élevés que celui du lagunage;
- la régulation de l'alternance de l'alimentation;
- un risque de présence d'insectes, de rongeurs, de reptile.

I.2.3.3.1.2. Lagunage à microphytes

Le lagunage naturel (ou lagunage à microphytes ou bassins de sédimentation) est un système dont le fonctionnement repose sur des mécanismes à la fois simples et complexes résultant de l'interaction entre les communautés biologiques sous l'influence des facteurs physico-chimiques et climatiques (ensoleillement, vent) du milieu (Kengne, 2000). Il comprend 4 types de bassins. Un bassin anaérobie qui est le siège d'une activité anaérobie conduisant à la dégradation de la matière organique, jusqu'à la formation des composés fins.

Un bassin facultatif caractérisé par la présence de deux zones, l'une profonde et anaérobie où se déroulent des processus de fermentation des boues décantées par des bactéries anaérobies et l'autre aérée caractérisée par l'activité des bactéries aérobies. Un bassin aérobie dans lequel les bactéries aérobies décomposent la matière organique, tandis que les algues, par photosynthèse, fournissent de l'oxygène en quantité suffisante pour maintenir l'aérobiose (Fig. 2) et d'un bassin de maturation qui reçoit des effluents tertiaires dont le rôle principal est de réduire les germes pathogènes.

Dans la même lancée du traitement des eaux usées, on utilise exclusivement le lagunage simple pour la deuxième partie du système.(Fig.2)



Fig.2. Fonctionnement du lagunage naturel.(Anonyme, 2000)

Les rendements, calculés sur les flux de matière organique, atteignent en moyenne près de 70 % (plus de 85 % en ne prenant en compte que la DCO filtrée en sortie, brute en entrée), ce qui correspond à une concentration en DCO filtrée de 125 mg/l. De plus, le débit et donc le flux rejeté, est souvent réduit en été (-50 %) par l'évapotranspiration. (Anonyme, 2000)

L'abattement du phosphore est remarquable les premières années ($\geq 60\%$), puis diminue pour atteindre un rendement nul au bout de 20 ans environ. Cette baisse est due à un relargage du phosphore depuis la vase du fond. Les conditions initiales seront restaurées par le curage des bassins (lorsque le milieu est sensible au phosphore, le curage doit avoir lieu au terme d'un délai plus court que les 10-12 ans généralement estimés et sur l'ensemble des lagunes) (Koné, 2002).

La désinfection est importante, particulièrement en été (abattement >10.000). Cette performance est liée au long temps de séjour de l'effluent (de l'ordre de 70 jours pour un traitement complet), à la compétition biologique et aux ultraviolets solaires.

I.2.3.3.1.3. Avantages et inconvénients

Tolérant aux variations de charge hydraulique et aux affluents très concentrés, cette technologie à un fonctionnement simple, est facilement exploitable et a son coût limité. L'inconvénient de ce système réside sur le fait qu'il occupe une très grande surface de terrain, présente la contrainte d'une contamination des nappes. Il représente un gîte de développement important des moustiques et où s'accumulent des boues mixtes très fermentescibles.

I.2.3.3.2. Procédés biologiques intensifs

I.2.3.3.2.1. Systèmes d'épuration à prédominance aérobie et à bactéries fixés

Dans les procédés à bactéries fixées, on propose à la culture bactérienne un support à la surface duquel elle se développe, formant une pellicule mince (Film biologique, Zooglé). A partir de ce schéma de principe, plusieurs variables technologiques ont été développées: les lits bactériens et les disques biologiques (Bechac et *al.*, cit.Kengne, 2000)

I.2.3.3.2.1.1. Lits Bactériens

Le processus de traitement par lit bactérien consiste à faire ruisseler les eaux usées préalablement décantées, sur un massif constitué par un matériau poreux ou caverneux. Ce remplissage sert de support aux micro-organismes qui forment un film au travers duquel diffusent le substrat et l'oxygène. Le matériau de support est constitué par des pouzzolanes (roches volcaniques) ou des cailloux concassés de granulométrie définie. L'alimentation en eau usée est discontinue, l'aération est pratiquée par tirage naturel ou par ventilation forcée (apport d'oxygène nécessaire au maintien des bactéries aérobies). Les matières polluantes contenues dans l'eau et l'oxygène de l'air diffusent, à contre courant, à travers le film biologique jusqu'aux micro-organismes assimilateurs. Le film biologique comporte des bactéries aérobies à la surface et des bactéries anaérobies près du fond. Les sous-produits et le gaz carbonique produits par l'épuration s'évacuent dans les fluides (Koné, 2002).

I.2.3.3.2.1.2. Disques Biologiques

Le disque biologique ou biodisque est un procédé biologique à cultures fixées. Le réacteur biologique est constitué de plusieurs disques minces en plastique montés sur un axe horizontal. L'eau usée, préalablement décantée, alimente un ouvrage dans lequel des disques fixés sur un axe, sont mis en rotation à vitesse lente. Sur ces disques biologiques en plastique se développe alors un film bactérien. Lors de leur émergence, ces bactéries prélèvent l'oxygène nécessaire à leur respiration et lors de l'immersion, elles absorbent la pollution dissoute dont elles se nourrissent. Dès que le film biologique dépasse une épaisseur de quelques millimètres, il se détache et est entraîné vers le décanteur final où il est séparé de l'eau épurée. Les eaux ainsi

piégées sont renvoyées par pompage périodique vers l'ouvrage de tête pour y être stockées et digérées. Les disques biologiques utilisés pour le traitement des eaux usées domestiques sont généralement précédés d'un dégrillage, d'un système de traitement primaire et, d'un bassin d'égalisation (Kengne, 2000).

I.2.3.3.2.2. Systèmes à floes mobiles ou boues activées

Parmi les méthodes intensives, ces systèmes sont ceux couramment utilisés pour l'épuration des eaux usées hospitaliers (CCLIN Paris-Nord, 2002). Les systèmes d'épuration à boues activées (très développés en Europe) nécessitent des installations lourdes au niveau technique et financier (Miss, 2007). Au Cameroun, particulièrement à Yaoundé, ce système a été réalisé dans les Cités-SIC de Messa et Cité-verte respectivement 1968 et 1987, pour des montants de 19.371.650 FCFA et de 213 921 000 FCFA (Koné, 2002). Elles peuvent cependant traiter une grande quantité d'affluent si elles sont bien dimensionnées. Les étapes successives de ce processus sont souvent mécanisées et automatisées.

Ces boues activées sont renouvelées en permanence par une circulation continue et se déroule en 3 étapes essentielles:

- Adsorption et absorption des matières organiques de l'effluent par les amas biologiques,
- Oxydation et dégradation de ces matières organiques puis multiplication des micro-organismes,
- Oxydation et dégradation d'une partie des amas biologiques eux-mêmes.

Ce procédé est également intéressant pour traiter les eaux usées très fortement chargées en matières organiques comme les eaux des industries agroalimentaires, les eaux des tanneries, des industries textiles, des raffineries de pétrole, des industries pétrochimiques ou de chimie organique. Cependant il est très coûteux.

I.2.3.4. Traitement tertiaire

On appelle traitement tertiaire ou mieux complémentaire tout traitement sur de l'eau déjà épurée par voie biologique. Il peut être envisagé en raison soit de l'insuffisamment du traitement précédant (biodégradables), soit pour les effluents domestiques à cause de la nécessité d'une protection accrue du milieu récepteur ou dans le souci de réutilisation de l'effluent. Il est recommandé dans le cas des effluents hospitaliers eu égard à la nature de la pollution.

Les trois familles de traitement physique, physico-chimique et biologique envisagées pour l'épuration sont applicables au traitement tertiaire, sous réserve d'une adaptation due au caractère dilué de la pollution à éliminer. Les paramètres les plus fréquemment concernés sont: la DBO₅, la DCO, les MES, les nitrates et les phosphates (causes d'eutrophisation), l'ammoniacque, les germes pathogènes et plus rarement d'autres corps chimiques tels que chlorures, sulfates ou métaux lourds. En plus de répondre aux conditions de rejet vers le milieu naturel, le traitement tertiaire vise à une épuration plus poussée des paramètres comme le phosphore et l'azote (Cors, 2007 cit. Ayo, 2013).

I.2.3.5. Traitement des Boues

Les boues constituent le résidu principal des stations d'épuration. Les matières organiques contenues dans celles-ci se dégradent avec une production d'odeurs nauséabondes. L'élimination des boues a pour but d'empêcher la putréfaction et de réduire leur volume. Le traitement des boues de petites stations est très différent de celui de grandes stations. Les procédés que nous allons énumérer sont plus spécifiquement réservés aux grandes stations.

I.2.3.5.1. Epaissement et stabilisation

I.2.3.5.1.1. Epaissement

Avant la digestion, on procède souvent à un épaissement destiné à diminuer le volume des ouvrages et en faciliter le fonctionnement. La densité des boues étant faible, il est possible d'utiliser la flottation pour les boues en excès. On injecte donc de fines bulles d'air qui les rendent plus légères que l'eau et permettent leur entraînement en surface.

I.2.3.5.1.2. Digestion anaérobie

Elle se produit dans des digesteurs anaérobies. Le milieu étant fermé, il ya échauffement favorisé le plus souvent par le chauffage utilisant les calories produits par la combustion du méthane dégagé. Le premier stade de digestion est dit acide en raison de la libération des acides aminés. Il est suivi d'un deuxième stade dit alcalin qui se traduit par un dégagement de méthane. La digestion permet d'éliminer environ 50% des matières volatiles et environ un tiers des matières sèches.

I.2.3.5.1.3. Stabilisation aérobie

La boue est oxydée par les mêmes systèmes (tubes d'aération, turbines) que les effluents bruts, ce qui provoque une minéralisation très poussée des éléments organiques pendant 15 à 20 jours.

I.2.3.5.2. Traitement des boues digérées

I.2.3.5.2.1. Lits de séchage

Ce sont des lits constitués de matériaux filtrant. La boue reste en surface et l'eau s'échappe par des drains. Cette solution a l'avantage de la simplicité mais est encombrante (il faut 1m² pour 5 à 15 usagers).

I.2.3.5.2.2. Incinération

L'humidité des boues empêche d'envisager une auto combustion lorsqu'elle est supérieure à 65-70%. Il faut un combustible d'appoint. Pour se faire, quatre méthodes existent actuellement(Kengne, 2000):

- les fours à étages multiples;
- les fours tournants;
- les fours à brûleurs cycloniques;
- les fours à lits fluidisés.

I.2.3.6.Considérations économiques du traitement des eaux usées

Le coût de traitement d'une eau usée dépend du débit à traiter, de la concentration des différents paramètres physico-chimiques et microbiologiques, mais aussi du type de station d'épuration utilisé et du niveau d'épuration recherché. Annexe(8) donne les fonctions de coût de chaque procédé de traitement (les fonctions de coût doivent être actualisées).

I.2.4. Normes et Règlementations

Les eaux usées rejetées dans un environnement donné doivent respecter les normes qualités de rejet d'eau prescrit par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), dans le cadre du respect et la protection de l'environnement, afin de limiter les risques de pollution et contribuer au processus de développement durable. Ces normes de rejet au Cameroun sont définies sont par le MINEPDED, avec les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques bien précises, suivant des lois qui régissent le bon état écologique, économique et sanitaire de l'utilisation de l'eau sur l'environnement. C'est par exemple le cas des caractéristiques que doivent respecter les effluents des stations d'épuration avant leur rejet dans les milieux récepteurs (Anonyme, 2008).

Les rejets incontrôlés d'eaux usées dans les quartiers sans réseaux d'égouts sont certes inévitables, mais l'existence des règles d'hygiène appliquées par les communautés peut atténuer et même réduire leurs effets néfastes sur l'environnement.

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Présentation du site de l'étude

Les travaux sur le terrain ont été menés entièrement dans la station d'épuration des eaux usées du CHU de Yaoundé I (Fig. 3).



Fig.3.Vue d'ensemble de la station d'épuration du CHU.

Le C.H.U de Yaoundé qui a été le siège des travaux de la présente recherche est un établissement hospitalier qui a vu le jour en 1977, en même temps que l'actuelle Faculté de Médecine et des Science Biomédicales (F.M.S.B) et l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique (E.N.S.P). Il est situé au quartier Melen, limité à l'Est par l'E.N.S.P, au Sud par le campus de l'Université de Yaoundé I, à l'Ouest et au Nord par le quartier et ancien marché Melen (Fig.4). Cet hôpital qui comprend une vingtaine de services (Hospitalisation Pédiatrie, Hospitalisation Chirurgie, Hospitalisation Médecine, Hospitalisation Gynécologie obstétrique, Laboratoire, Bloc Opératoire, Accueil, Consultation Périnatale, Service Administratif, Service Technique, Réanimation, Radiologie, Stérilisation Centrale, Urgences, Pharmacie, Consultation Médecine Externe, Vaccination; Restaurant, Buanderie, Exploration Fonctionnelle, Archives) a une capacité d'environ 250 lits. Cet établissement hospitalier est alimenté en eau par la CDE (Camerounaise Des Eaux) et il produit de nombreux effluents qui proviennent de l'activité quotidienne de ses différents services parmi lesquels les plus grands producteurs sont les toilettes, les WC, les services d'hospitalisation, les salles des soins, les 5 laboratoires d'analyse (Parasitologie, Hématologie, Bactériologie, Biochimie, Anatomopathologie), le restaurant et la buanderie. Pour éviter les risques de contamination et de pollution

liés à ces effluents, il a été prévu lors de l'installation du C.H.U de Yaoundé, une STEP chargée de traiter ces eaux usées avant leur rejet dans la nature (Fig.3).

Les coordonnées géographiques du site ont été prise à l'aide d'un GPS (Global Positioning System) de marque Garmin. La station d'épuration des eaux usées du CHU s'étend entre les parallèles 3°51'42'' de latitude nord et les méridiens 11°29'47'' de longitude Est-Ouest à une altitude de 947 m (Fig. 4).



Fig.4. Localisation du site d'étude.

- Ancienne station d'épuration du CHU
- Centre Hospitalier Universitaire (CHU)

La station d'épuration des eaux usées du CHU est située dans une zone où règne un climat équatorial de type guinéen, caractérisé par l'existence de 4 saisons aux délimitations de moins en moins marquées, qui s'alternent dans l'année avec une grande saison de pluies (mi-août à mi-septembre), une grande saison sèche (mi-novembre à mi-mars), une petite saison de pluies (mi-mars à mi-juin) et une petite saison sèche (juillet à août). Ce climat est caractérisé par l'abondance de pluies (1650 mm/an), et une température moyenne de 23,5 °C contrastée entre 16 et 31 °C selon les saisons. L'hygrométrie moyenne de 80 %, varie dans la journée entre 35 et 98 % (Tchinda, 2000).

II.2.Méthodes

II.2.1. Diagnostic de l'état de la station d'épuration en matière de gestion des eaux usées

II.2.1.1 Etudes de terrain

Les descentes sur le terrain ont permis de recueillir des informations relatives à la gestion des déchets liquides (eaux usées) auprès du personnel du CHU de Yaoundé et des populations grâce aux techniques d'enquêtes, d'entretien et d'observation. (Fig.5)



Fig.5. Vue partielle du site d'étude. (a-STEP actuelle; b-Dégrillateur; c-Bassin d'aération ; d-Regard; e-Salle de contrôle; f- Lac Atemengue)

II.2.1.2. Techniques d'enquêtes

Pour la collecte des données, une enquête auprès du personnel du CHU c'est effectuée dans l'enceinte de l'hôpital et à l'extérieur. Un questionnaire semi structuré a été administré aux personnels du CHU et aux personnes environnantes du site d'étude. Ces enquêtes ont été réalisées suivant les techniques d'enquêtes et de sondage proposés par Brossier et Dussaix (1999). L'enquête a pour but de recueillir les avis des populations et du personnel sur le système de gestion des eaux usées et leurs impacts sur l'environnement et la santé.

II.2.2. Evaluation de l'efficacité du système présent dans le traitement des eaux usées du CHU

Après avoir fait un diagnostic préalable du site d'étude, on a effectué des analyses à l'entrée et à la sortie de la station actuel qui nous permettront de mesurer le degré de pollution des eaux usées rejetées par le CHU suivants les différents paramètres.

Ensuite, les résultats des analyses nous ont mené à proposer un dispositif adéquat pour remédier à ces rejets des eaux usées non traitées dans l'environnement.

II.2.3. Système proposé pour un traitement des eaux usées du CHU.

Le dispositif expérimental mise en place est un système hybride de filtre planté de roseaux combiné au lagunage naturel. Il consistera à appliquer les E.U (3l-5l) dans la première partie du système pendant un séjour d'un jour, dont son percolat sera introduit dans le deuxième système pour poursuivre le traitement. Le filtre planté de roseaux qui constitue le premier système est constitué d'une série de quatre pilotes de 1/5 m³ représentant la section d'un filtre planté de roseaux à flux vertical supportant une végétation constituée d'*E. pyramidalis* récoltés dans le milieu naturel (abords de l'ancien STEP) situé au CHU de Yaoundé I. Chaque bassin du premier système a été ensemencé de 4 boutures d'*E. pyramidalis*.

Les plantes ont été alimentées à saturation avec les eaux usées provenant de la STEP du CHU de Yaoundé I pendant environ trois semaines afin que les plantes puissent s'acclimater à leur nouvel environnement.

Ce premier système a été combiné à un lagunage naturel à répétition où on a des bacs de sédimentation et maturation (Fig.6).



Fig.6. Système hybride (a-lagunage naturel ; b-Filtre planté de roseaux combiné)

1-Echinochloa pyramidalis ;2-Filtre planté à écoulement verticale (FPEV) ;3-Sceau de collecte du percolat du FPEV ;4-Fuit de collecte du percolat du FPEV ;5-Bassin de sédimentation ;6-Bassin de Maturation ;7-Bouteille de récolte des eaux usées issues du lagunage naturel.

Le lagunage naturel, par contre qui représente la deuxième partie du système est constitué d'un réservoir de 0,6 m³ qui servira au stockage des eaux usées provenant du premier

système. Un tuyau d'environ 0,1 m de longueur et de 10 mm de diamètre était fixé sur les réservoirs (bassin de 40 l, fuit de 60l) et permettait d'alimenter manuellement les eaux usées sur le système hybride (principal paramètre de dimensionnement des stations de traitement des eaux usées). Les percolats issus du système à filtre planté de roseaux seront récupérés dans des petits seaux de 10 l de volume. Ensuite ces percolats serviront à alimenter le deuxième système qui est le lagunage naturel en deux temps de rétention de 3 jours à 7 jours. Les alimentations en percolat du deuxième système sera fait par bâchées pour assurer une distribution optimum des eaux sur la totalité de la surface du lagunage ainsi que pour améliorer l'oxygénation. Toutefois le premier système repose sur un massif filtrant composé de trois couches de matériau de granulométrie croissante du haut vers le bas (Tableau III).

Tableau III. Caractéristiques du substrat utilisé dans les bacs expérimentaux (Kengne, 2008).

Paramètres Substrat	Diamètres (mm)	Hauteurs (cm)	Porosité (n)	Coefficient d'uniformité(Cu)
Sable	0,3-2	15	40,30	3,55
Gravier fin	5-15	20	47,73	1,67
Gravier grossier	15-25	30	50,00	1,37

II.2.4. Analyses de laboratoire

Les analyses effectuées permettront de mesurer le degré de pollution des eaux usées rejetées. Après obtention des percolats du système hybride, ceux-ci seront rassemblés dans un cubitenaire, puis homogénéisés et immédiatement prélevés à l'aide des bouteilles en polyéthylène propre de 1,5 l de volume. Le choix des charges hydrauliques ont été obtenu à partir des données de la littérature suite aux calculs et aux comparaisons des moyennes des charges hydrauliques utilisées par les autres auteurs travaillant sur les filtres plantés et le lagunage traitant les eaux usées en zone tropicale. Les percolats recueillis après percolation à travers le système (affluent) sont collectés et ramené au laboratoire pour analyses physicochimiques et bactériologiques.

II.2.4.1 Analyse physico-chimique

Les différents paramètres physico-chimiques retenus sont: le pH, la conductivité (Cnd), la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO₅), les ions phosphates (PO₄³⁻), les ions ammoniums (NH₄⁺), les ions nitrates (NO₃⁻), ont été déterminées selon les protocoles standards (Anonyme,2000).

II.2.4.1.1. Mesure des matières en suspension (MES)

Les matières en suspension sont déterminées par la méthode dite «*photométrie*». L'échantillon d'eau usée est prélevé dans une cellule de 25 ml et placé dans le spectrophotomètre Hach DR/2010. La teneur des MES par référence à un témoin qui est l'eau distillé, est lue directement sur l'écran digital en mg/l, à la longueur d'onde 810 nm.(Anonyme, 2000)

II.2.4.1.2.Mesure de la demande chimique en oxygène (DCO)

La mesure de la demande chimique en oxygène est faite par la méthode dite de «*digestion au réacteur*». Après homogénéisation des échantillons d'eau usée, 2 ml sont prélevés et introduits dans des tubes à DCO, puis incubés en présence d'un témoin à 150 °C pendant 2 heures dans un réacteur (appareil de chauffage multitubes) de DCO de marque Hach. Après refroidissement des tubes, la valeur de la DCO de l'échantillon est lue en mg/l, au spectrophotomètre de marque Hach DR/2010, à la longueur d'onde 600 nm.(Metcalf et Eddy, 1991)

II.2.4.1.3.Mesure de la demande biochimique en oxygène en 5 jours (DBO₅)

La détermination de la demande biochimique en oxygène s'est faite par la méthode dite «*manométrique*» à l'aide d'un appareil à DBO₅ de marque Hach (model 2173B). Des bouteilles à DBO₅, contenant des volumes de 164 ml d'eaux usées pour l'entrée et 250 ml pour la gaine de prélèvement et l'exutoire, auquel est ajouté un tampon nutritif pour DBO₅, sont incubées pendant 5 jours consécutifs à la température de 20 °C. Pendant cette période, les bactéries utilisent l'oxygène présent dans la partie supérieure de la bouteille pour oxyder les matières organiques présentes dans la solution et rejettent le CO₂. Celui-ci est fixé par les cristaux d'hydroxyde de potassium (présents dans la cupule placée à la tête de chaque bouteille appelée Oxitop). La valeur de la DBO₅ est lue directement sur l'Oxitop.(De Villers et *al.*,2005)

II.2.4.1.4.Mesure du potentiel hydrogène (pH)

Les mesures du pH et du potentiel redox (Eh) ont été déterminées à l'aide d'un pH-mètre de marque Hach (HQ11d). Après calibrage préalable du pH-mètre à l'aide des tampons de valeurs 7,00 et 4,01, l'électrode en verre a été introduite dans 100 ml d'échantillon et les valeurs sont lues sur l'écran à affichage digital. (Anonyme, 2000)

II.2.4.1.6. Mesure de la conductivité électrique

Les mesures de la conductivité électrique ont été effectuées à l'aide d'un conductimètre de marque Hach (HQ14d). Cet appareil est muni d'une sonde standard qui est plongée verticalement dans la solution dont on souhaite déterminer la concentration. La valeur de la conductivité est lue sur un écran à affichage digital. Cette conductivité s'exprime en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou en mS/cm suivant la concentration de l'échantillon. (Anonyme, 2000)

II.2.4.1.7. Mesure de la couleur

La mesure de la couleur s'est faite au nm. Un volume 25 ml d'échantillon est placé dans une cuve spectrophotométrique et introduite dans le spectrophotomètre Hach DR 2010. La lecture de la couleur se fait à $\lambda = 455 \text{ nm}$ par référence à la couleur de l'eau distillée. (Anonyme, 2000)

II.2.4.1.8. Mesure des nitrates

Les ions nitrates ont été déterminés par la méthode de réduction au cadmium à l'aide d'un spectrophotomètre de marque Hach DR/2010. Après introduction de 10 ml d'échantillon d'eau usée dans une cellule spectrophotométrique, on y ajoute un sachet de *Nitraver 5 reagent*. Le mélange est ensuite homogénéisé et laissé au repos pendant 5 minutes (temps de réaction). La coloration développée en présence des NO_3^- est ensuite lu au spectrophotomètre à la longueur d'onde 500 nm. La teneur du paramètre considéré est lue sur l'écran d'affichage digital de l'appareil par référence à un témoin constitué de 25 ml de l'échantillon d'eau usée et le résultat est exprimé en mg/l. (De Villers et al., 2005)

II.2.4.1.9. Mesure de l'orthophosphate

Sa détermination s'est faite par la méthode dite du «*molybdovanadate*». Un ml du réactif molybdovanadate est ajouté à chaque échantillon d'eau usée ainsi qu'à un témoin (eau distillée). Si les molécules d'orthophosphates sont présentes, elles vont réagir avec le molybdate dans un milieu acide pour former le complexe phosphomolybdate. En présence de vanadium, l'acide vanadomolybdophosphorique qui a une couleur jaune. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des phosphates présents dans le milieu. La lecture se fait au spectrophotomètre Hach DR/2010 à la longueur d'onde 430 nm, et les valeurs sont affichées sous forme d'orthophosphates (PO_4^{3-}), et exprimées en mg/l. (De Villers et al., 2005)

II.2.4.2. Analyses bactériologique des eaux usées

Elle a pour but d'évaluer les performances épuratoires de la station sur le plan sanitaire, c'est-à-dire sa capacité à éliminer les germes pathogènes. Les micro-organismes retenus sont bioindicateurs de la pollution fécale: coliformes fécaux (CF) et streptocoques fécaux (SF). (Chedad et Assobhei, 2007)

II.2.4.2.1. Coliformes fécaux

La méthode d'analyse par "colimétrie sur membrane filtrante" a été utilisée. Après filtration de l'eau à examiner, la membrane est placée sur un support approprié (gélose ou tampon absorbant saturé en milieu nutritif). Les colonies de coliformes fécaux sont dénombrées après une période de 45°C. (Chevalier et *al.*, 2003)

II.2.4.2.2. Streptocoques fécaux

La méthode d'analyse par "filtration sur membranes" a été utilisée. Après filtration de l'échantillon à analyser sur un membre de cellulose, celle-ci est appliquée sur un support nutritif contenant des substances inhibitrices pour tous les germes autres que les colonies de streptocoques fécaux. Les colonies de coliformes fécaux sont dénombrées après 24h d'incubation à 35°C. (Chevalier et *al.*, 2003)

II.3. Taux d'abattement des paramètres et rendement du système de traitement

L'effet des charges polluantes sur le rendement épuratoire de la station expérimentale a été évalué après détermination des concentrations des paramètres physico-chimiques et bactériologiques à l'entrée et à la sortie du système. Les paramètres considérés ont été le pH, la conductivité (CND), les ions phosphates (PO_4^{3-}), les ions nitrates (NO_3^-), la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO_5), les coliformes fécaux (CF) et les streptocoques fécaux (SF).

Le calcul du rendement du système s'est fait en fonction de la charge polluante moyenne obtenue à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration expérimentale du CHU des eaux usées. Pour le déterminer, la formule suivante a été utilisée (Kengne, 2000):

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100$$

Où C_e = charge polluante à l'entrée

C_s = charge polluante à la sortie

II.4. Analyses statistiques

La comparaison des moyennes s'est faite suivant le test de Student Newman Keuls au seuil de significativité de 5 % à l'aide du Logiciel Excel. Il nous a permis d'observer les différences et les variations des paramètres étudiés à l'intérieur d'une campagne de prélèvement et entre les différents échantillonnages réalisés. Les résultats des différents paramètres analysés sont exprimés sous forme de moyenne \pm écart-type. Ces moyennes sont présentées sous forme de tableaux ou histogrammes grâce au Logiciel Excel 2007.

II.5. Analyse économique

Les paramètres qui influencent le coût de traitement des eaux usées du C.H.U par le système actuel constitué d'un bassin de neutralisation-égalisation, d'une grille de prétraitement, d'une station d'épuration associée à un compartiment de chloration et à un lit de séchage des boues ont été déterminés conformément à l'étude menée par Eckenfelder (1982). Ce coût a été déterminé à l'aide des formules et les dépenses associées à ce système (coût des pièces de rechange, coût d'entretien et de maintenance, consommation d'électricité, salaire du personnel d'entretien et assistance technique) est un himation par rapport à celle de la station à boues activées de la Cité Verte. (Anonyme, 2000). L'estimation de ces coûts permettra de constater lequel des deux systèmes présentés est le plus financièrement avantageux.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1.RESULTATS

III.1.1. Diagnostic de l'état de la station d'épuration en matière de gestion des eaux usées

III.1.1.1. Paramètres organoleptiques

III.1.1.1.1. Couleur

La couleur moyenne mesurée à différentes heures de prélèvement du site présente le maximum de valeur (23068 PtCo) à 6h et son minimum à 16h (604 PtCo). L'analyse statistique de ce paramètre montre une différence statistique entre les prélèvements du matin et celle de la soirée.

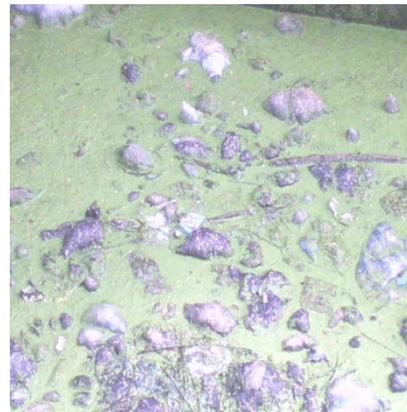
La couleur de l'eau est un paramètre capital pour les métabolismes photosensibles des êtres vivants aquatiques. La Fig. 7a ci-dessous, présente la couleur des eaux usées du C.H.U de Yaoundé à la sortie de la station d'épuration pendant la saison sèche vers midi.

III.1.1.1.2. Odeur

L'on note un dégagement d'odeurs nauséabondes et pestilentielles générées par l'odeur propre aux animaux et par l'altération de la matière fécale présente dans les effluents et les déchets entassés dans le site (Fig.7b)



(a)



(b)

Fig.7.Etat de la STEP du CHU de Yaoundé I (a-couleur des eaux usées; b- Ecume formé)

III.1.1.2. Nature des équipements d'assainissement de la STEP

III.1.1.2.1. Réseau de collecte des eaux

Le réseau de collecte est de type séparatif (réseau de collecte des eaux usées séparé de celui des eaux pluviales). Le réseau de collecte des eaux usées est constitué de caniveaux techniques qui collectent les eaux usées à l'intérieur du C.H.U et des conduites circulaires enterrées de diamètres variables qui drainent ces eaux usées vers la STEP. Le long de ce réseau, il est disposé des regards de visite qui permettent un meilleur contrôle et le curage. La collecte

est gravitaire et la pente moyenne entre le C.H.U et la STEP permet une bonne circulation des eaux.

II.1.1.2.2. Traitement des eaux usées

La structure prévue pour le traitement des eaux usées du C.H.U, de la F.M.S.B et l'E.N.S.P est une station d'épuration à boues activées de capacité 450 m³/l, équipée d'un système de dégrillage (prétraitement), de deux bassins d'aération et de décantation munis chacun d'un aérateur des boues, d'un compartiment de chloration, d'un lit de séchage des boues (bac à sable) à trois compartiments, de multiples vannes pour le contrôle de l'entrée de l'eau et de la sortie de l'eau dans les bassins d'aération et de décantation, des conduites des eaux épurées qui comportent deux regards

Le principe de fonctionnement de cette station est le suivant: les eaux à traiter sont filtrées sur grille puis brassées dans le premier bassin d'aération. Pendant ce temps, l'entrée du deuxième bassin est fermée et sa turbine en arrêt. Après deux heures de brassage dans le premier bassin, le système du deuxième prend le relais. Les eaux clarifiées dans chaque bassin pendant la phase d'arrêt passent dans le compartiment de chloration et ressortent par les conduites de sortie des eaux épurées. Lorsque le niveau de boues devient important, l'excès est pompé sur le lit de séchage.

III.1.1.3. Etat actuel des équipements d'assainissement au CHU

III.1.1.3.1. Réseau de collecte des eaux usées du CHU

A l'heure actuelle, les caniveaux techniques suite au vieillissement et au mauvais entretien comportent plusieurs fissures par les quelles sont observées les fuites d'eaux usées qui s'infiltrent dans le sol au risque de contaminer les nappes souterraines. De plus, suite au mauvais usage des équipements (introduction des objets non biodégradables), de l'insuffisance ou de l'absence de curage, les conduites enterrées sont bouchées avant la station d'épuration. Il en résulte l'épandage des eaux usées non traitées de l'hôpital entre les billons, dans les parcelles cultivées situées entre le C.H.U et l'Université de Yaoundé I et sur les pistes empruntées par les étudiants et les enfants des quartiers environnants (Fig.8b). Cette situation expose les populations à de nombreuses maladies dont les germes sont véhiculés par ces eaux qui proviennent d'un établissement hospitalier.

III.1.1.3.2. Bâche de neutralisation et de stabilisation

Aujourd'hui la pompe est abîmée, la bâche est pleine d'eaux usées provenant des laboratoires dont le surplus s'échappe par le trop plein pour se déverser dans les conduites qui mènent les eaux usées à la station d'épuration. Ces eaux accumulées dans la bâche depuis plusieurs années ont une couleur sombre et dégagent une odeur très forte qui témoigne de leur grande concentration en produits chimiques toxiques.

III.1.1.3.3. Etat de fonctionnement de la station d'épuration du C.H.U de Yaoundé

Depuis plusieurs années, cette station d'épuration est hors service suite aux pannes régulières, au manque de personnel d'entretien qualifié et à la non-prévision d'un budget annuel pour son fonctionnement. Ainsi, les deux moteurs ou aérateurs des boues ont été volés, les multiples vannes sont rouillées, le compresseur est défectueux, les différents compartiments sont fissurés, le bac à sable est abîmé (le sable et le gravier ont été volés) (Fig.8a). La partie d'eau usée qui arrive à la STEP stagne dans les bassins d'aération puis s'échappe sans aucun traitement vers l'un des lacs de l'Université de Yaoundé I (le lac Atemengue) où elle se déverse entraînant un risque grave de contamination et de pollution. De plus, les odeurs nauséabondes sont persistantes dans cette zone.



(a)



(b)

Fig. 8. Vue d'ensemble de la STEP du CHU (a- Eau usée stagnante dans le bassin d'aération; b- Eaux usées se déversant dans la nature).

III.1.2. Evaluation de l'efficacité du traitement des eaux usées de la station d'épuration actuelle du CHU

III.1.2.1. Caractéristiques physico-chimiques

La composition physicochimique des rejets d'eaux usées de la station actuelle du CHU présente des charges polluantes élevées après trois campagnes (Tableau IV). Ces résultats montrent également que ces eaux sont très riches en substances organiques, minérales et particulaires. Les valeurs de DCO (**2240,5 mg/l**) et de DBO₅(**890,4 mg/l**) restent dans la gamme des valeurs de référence pour les eaux usées d'origine domestique avec un rapport moyen de DCO / DBO₅ de 2,51

Tableau IV. Caractéristiques physico-chimiques à la sortie de la station en comparaison avec les normes.(Min: minimum; Max: maximum)

Paramètres	Moyenne ± écart-type	Norme de rejet (MINEPDED)	Min - Max
pH (unités de pH)	7,4 ± 0,3	6-9	7,07 - 8
Température (°C)	28,28 ± 1,8	30	22 - 27
CND (µS/cm)	340,2 ± 210,2	/	143 - 538
MES (mg/l)	111,7 ± 67,3	≤ 30	311 - 3930
Couleur (Pt-Co)	6736 ± 4428,3	/	955 - 11550
NH₄⁺ (mg/l)	31,33 ± 21,3	≤ 30	10 - 62,25
NO₃⁻ (mg/l)	79,65 ± 77,6	/	0 - 190
PO₄³⁻ (mg/l)	164,75 ± 136,9	≤ 10	17,5 - 350
DCO (mg/l)	2240,5 ± 2309,7	≤ 200S	849 - 6005
DBO₅ (mg/l)	890,4 ± 347,8	≤ 100	120 - 960

Les valeurs obtenues sont largement au dessus de la norme du MINEPDED.

Ces résultats d'analyses montrent également que ces eaux sont très riches en substances organiques et minérales. Les valeurs 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 2,51.

III.1.2.2. Caractéristiques bactériologiques

L'analyse bactériologique des eaux usées brutes entrant dans le système épuratoire de l'ancienne station du CHU montre que les coliformes et les streptocoques fécaux sont présents en moyenne à des concentrations élevées, respectivement de 7800 et 4300 UFC/100 ml (Tableau V).

Tableau V. Concentration moyenne des paramètres bactériologiques des eaux usées du C.H.U de Yaoundé.

Paramètres Echantillons	Coliformes fécaux (UFC/ 100 ml)	Streptocoques fécaux (UFC/100 ml)
Entrée	7800	4300
Sortie	6500	2800

Ces concentrations bactériennes élevées, obtenues dans la station actuelle du CHU sont dans la gamme des concentrations des bactéries ($10^4 - 10^9$) couramment retrouvées dans les eaux usées (Anonyme, 1992). Elles rentrent dans le même ordre de grandeur que celles rencontrées dans les effluents urbains (Anonyme, 2008).

III.1.3. Système proposé pour un traitement des eaux usées du CHU

III.1.3.1. Paramètres physico-chimiques

De manière générale, la qualité physique et chimique des eaux usées de la station expérimentale s'améliore de l'entrée à la sortie du système témoignant une élimination des substances polluantes présentes dans l'eau. Les paramètres physico-chimiques des eaux usées du C.H.U varient en général suivant les différents niveaux de traitement. A première vue, on constate que malgré la dilution, plusieurs de ces paramètres notamment les MES, la DCO, la DBO₅, les nitrates et les phosphates ont des valeurs supérieures aux normes considérées (tableau VI)

Tableau VI. Caractéristiques physico-chimique des eaux usées de la station d'épuration actuelle du C.H.U de Yaoundé.

Paramètres	Concentration		Normes de rejet (MINEPDED)
	Entrée	Sortie	
CND ($\mu\text{S/cm}$)	$143,2 \pm 10,23$	$538 \pm 83,86$	
MES (mg/l)	$111 \pm 17,31$	$19 \pm 3,69$	
NO_3^- (mg/l)	$80 \pm 7,65$	$01 \pm 0,29$	≤ 30
NH_4^+ (mg/l)	$100,1 \pm 21,29$	$3,8 \pm 1,31$	≤ 30
PO_4^{3-} (mg/l)	$80 \pm 6,89$	$01 \pm 0,81$	≤ 10
DCO (mg/l)	$2240 \pm 209,72$	$150 \pm 32,21$	≤ 200
DBO_5 (mg/l)	$700 \pm 127,79$	$60 \pm 57,85$	≤ 50

L'étude des variations temporelles des paramètres physico-chimiques montre que les valeurs obtenues sont légèrement plus élevées dans les filtres plantés de roseau que dans le lagunage pendant le prélèvement. La faible dilution des effluents due aux faibles débits des eaux à ce moment de la journée (10h-16h) contribuerait à élever la concentration des polluants dans les eaux même si l'analyse statistique révèle que les différences observées ne sont pas significatives (tableau VII).

Tableau VII. Résultats statistiques de la variation de différents paramètres physico-chimiques en fonction du temps (6h-18h).

Paramètres	Probabilités (P)
Température ($^{\circ}\text{C}$)	0,663

MES (mg/l)	0,229
Ph	0,670
DCO (mg/l)	0,110
DBO ₅ (mg/l)	0,090
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0,196
NH ₄ ³⁻	0,100
PO ₄ ³⁻	0,134

Il ressort du tableau ci-dessus que l'analyse statistique de la variation des différents paramètres physico-chimiques mesurés donne dans tous les cas des probabilités (P) supérieures à 5%. Ainsi, la variation de chacun de ces paramètres n'est pas statistiquement significative.

III.1.3.1.2. pH, température et conductivité

Les valeurs moyennes du pH sont relativement constant c'est-à-dire oscillent autour de 7,45. Cependant on note une très légère remontée de ce paramètre vers la sortie (Fig. 9 b). Cette évolution obéit aux différentes filières d'exploitation de la station. En effet, l'augmentation du pH vers les derniers bassins est liée à l'activité photosynthétique algale due à un rejet de CO₂ (Kengne, 2000). L'analyse statistique des variations de pH aux différents bassins de prélèvement a montré une différence significative (P > 5%).

La température de l'eau (Fig. 9 a) ne fluctue pas significativement d'un bassin à l'autre d'après le test non paramétrique de Kruskal-Wallis (P=0,504).

La plus grande valeur de la conductivité électrique (CND) est enregistrée à la sortie du système (538 μS/cm) tandis qu'elle passe de 187,7 μS/cm du filtre planté de roseau à 410 μS/cm au lagunage naturel le long de la station (Fig. 10a). L'étude de ce paramètre présente une différence significative (P < 5%).

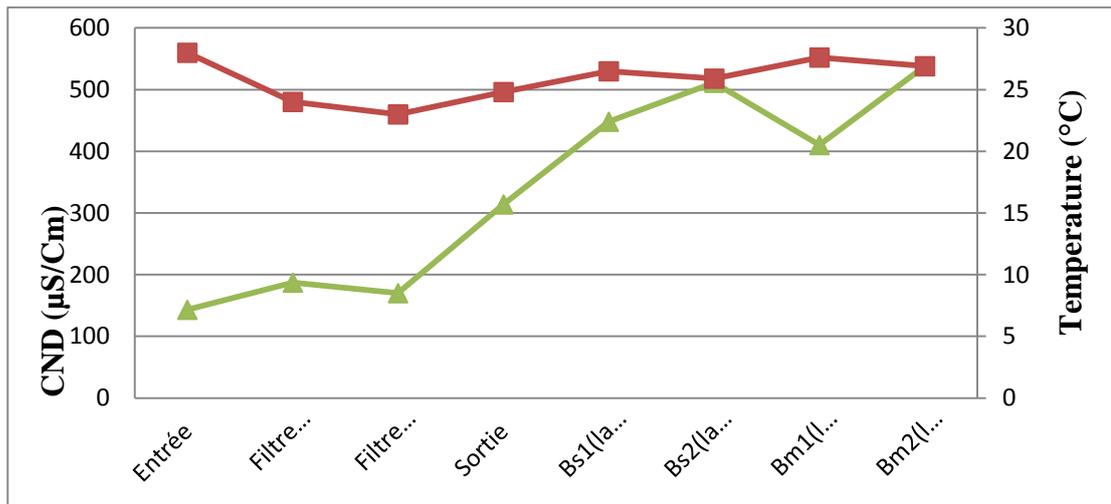


Fig. 9.a. Evolution température et de la conductivité dans les différents étapes du système de traitement.

— T° (°C) — CND(μS/Cm)

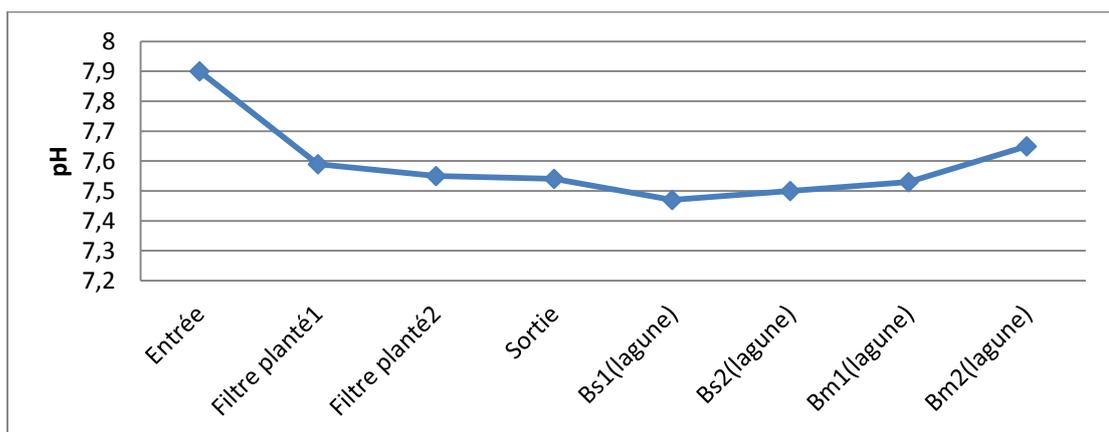


Fig. 9.b Evolution du pH dans le système de traitement de la station expérimentale des eaux usées du CHU.

— Ph

III.1.3.1.2. Demande Chimique en Oxygène, Demande Biochimique en Oxygène et Matière En Suspension

A l'instar des courbes obtenues lors des filières antérieures (filtre plantés de roseau et lagunage), la cinétique de ces trois polluants montre une élimination en 2 phases (Fig.10). Au cours de la deuxième phase (brutale), entre Bs1 (Bassin de sédimentation) et Bm2 (Bassin de maturation), environ 70% de la réduction a lieu. D'après Cors (2007), la sédimentation et la précipitation sont les principaux mécanismes qui concourent à l'abattement des paramètres

physico-chimiques dans la filière du lagunage qui est la deuxième phase du système. La première phase qui est celle du filtre planté de roseau présente les polluants qui par effet de leurs poids subissent l'influence de la pesanteur. Les activités épuratoires dominantes se résumeraient à la précipitation, à la volatilisation, à l'absorption végétale et aux réactions d'oxydoréduction (Fonkou, 2010).

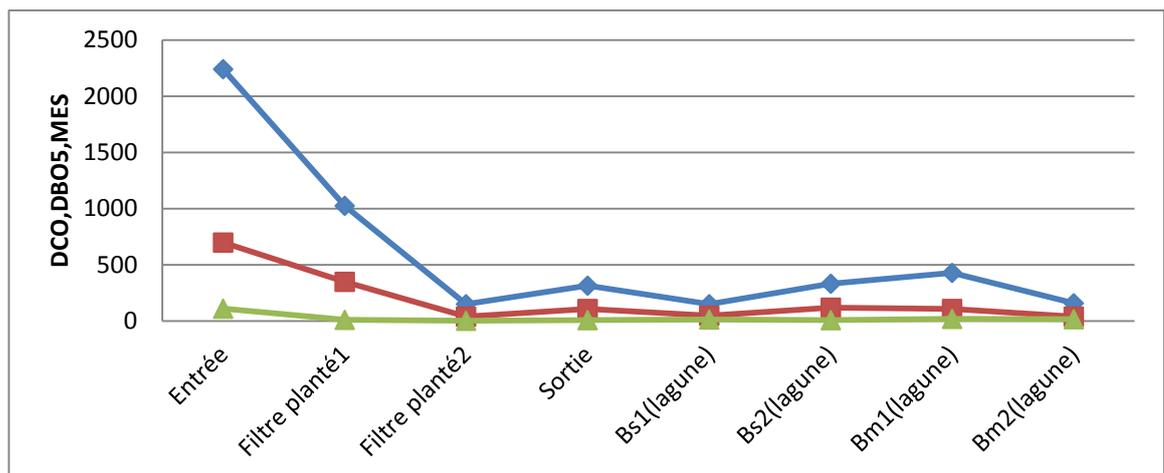


Fig. 10. Evolution DCO, DBO₅, MES le long du système de traitement des eaux usées du CHU.

— DCO (mg/l) — DBO5 (mg/l) — MES (mg/l)

III.1.3.1.3. Ammonium, Nitrates et Orthophosphates

Globalement, l'élimination de ces 3 polluants s'effectue en 2 phases (Fig.11). La première phase d'abattage commence de l'entrée du filtre planté de roseaux à la sortie de ce même système. Par la suite la deuxième phase d'abattage de ces polluants a lieu pendant le lagunage (bassin 1 et 2), et montre une courbe presque constante. Cette constante des paramètres inorganiques a lieu dans les bassins de maturation et traduirait vraisemblablement leur faible élimination due à la restitution particulière algale (Fonkou, 2010).

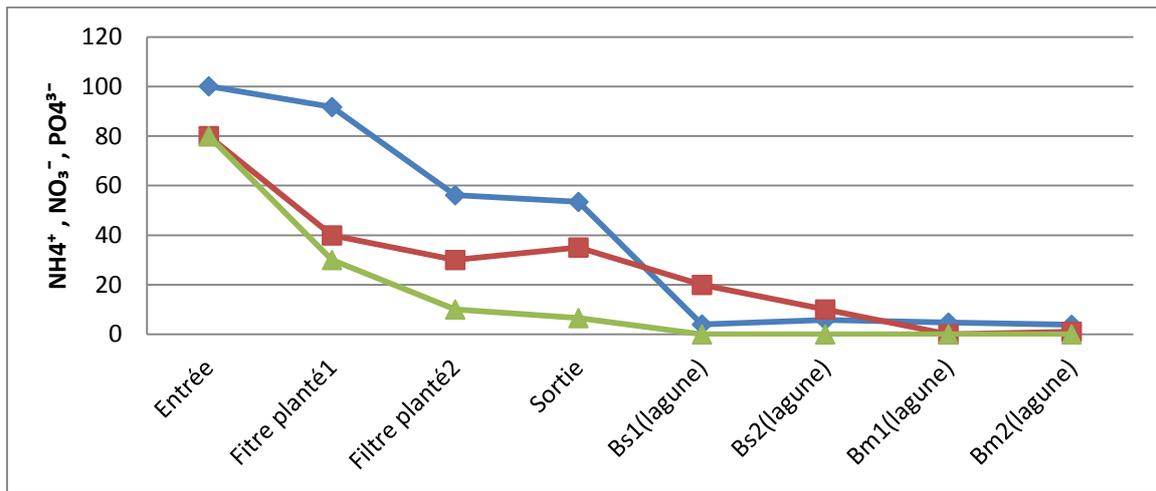


Fig. 11. Evolution des NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} le long du système de traitement des eaux usées du CHU.

■ NH_4^+ (mg/l)
 ■ NO_3^- (mg/l)
 ■ PO_4^{3-} (mg/l)

III.1.3.2. Paramètres bactériologiques

III.1.3.2.1. Bio-indicateurs de pollution CF et SF

Les dilutions effectuées n'ont pas permis d'obtenir les nombres exacts d'individus de chacune des espèces de micro-organismes présents dans chacun des échantillons d'eaux usées du CH.U. Les résultats obtenues (tableau VIII) montrent clairement que ces eaux sont très chargées en micro-organismes indicateurs de la pollution dont toutes les valeurs sont supérieures à 10^5 individus/ 100 ml. La relation $\text{CF} > \text{SF}$ est maintenue dans les 2 systèmes durant toute la période de l'étude (Fig. 12). Cette observation démontre la primauté de la contamination fécale d'origine humaine dans la station. L'élimination de ces 2 polluants est progressive d'environ 0,5 unité log par bassin de chaque système et fortement significative d'après les analyses statistiques non paramétriques de Kruskal-Wallis ($P < 0,000$). Cette baisse graduelle de la population bactérienne est liée à celle de la matière organique (Martin&Bonfont, cit. Kengne, 2000). Toutefois, il est à noter que cette élimination reste faible comparée à celle obtenue au cours des filières à macrophytes (Anonyme, 2000), probablement en raison de la surcharge du système.

Le déversement d'une eau ainsi chargée en microbes dans la nature sans aucun traitement entraîne inévitablement la contamination du milieu récepteur et la propagation des maladies hydriques surtout la diarrhée qui est à l'origine d'une forte mortalité infantile en Afrique.

Tableau VIII. Paramètres bactériologiques des eaux usées du C.H.U de Yaoundé.

Paramètres	Concentration		Normes de rejet (MINEPDED)
	Entrée	Sortie	
CF (UFC/100 ml)	7000 ± 904,5	300 ± 99,7	≤ 2000
SF (UFC/100 ml)	3000 ± 465,2	100 ± 91,5	≤ 1000

Les teneurs moyennes des coliformes et des streptocoques fécaux diminuent au fur et à mesure qu'on avance dans le processus traitement.

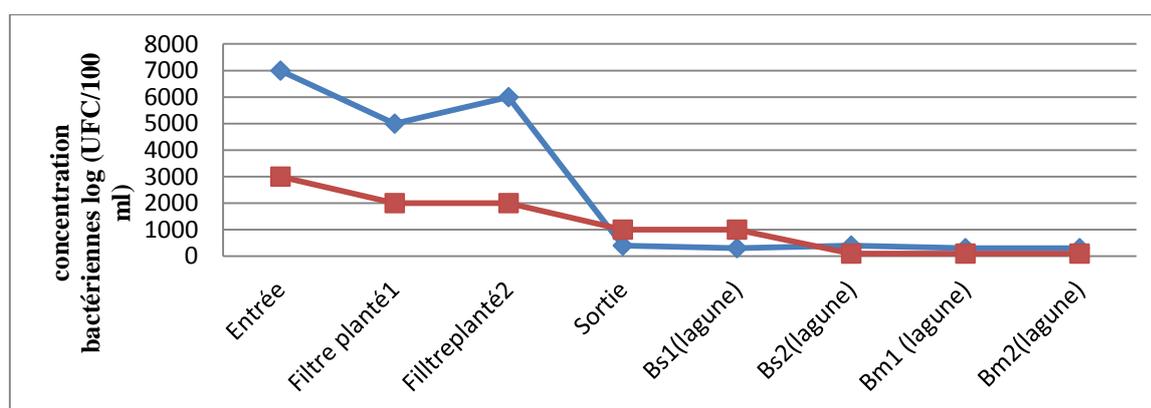


Fig. 12. Evolution de la teneur des coliformes et des streptocoques fécaux dans les eaux usées le long du système hybride souterrain du CHU.

— CF log(UFC/100 ml) — SF log(UFC/100 ml)

Les teneurs des CF et SF très élevées dans l’affluent (Fig.12), sont réduits respectivement 1,94 et 2,63 ulogà la sortie du système. La diminution des ces indicateurs de la pollution fécale le long du processus de traitement serait due à la porosité des mailles des matériaux filtrant qui est un facteur important dans la rétention des bactéries. D’autres facteurs tels que la teneur en matières organiques de l’affluent et l’effet des autres microorganismes auraient un rôle non négligeable à jouer dans la rétention des bactéries. Des études ont montré que la teneur en matière organique retenue dans la matrice filtrante serait liée à l’augmentation de la capacité d’échange cationique, de la surface d’attache et le nombre de sites d’adsorption par les bactéries adsorptrices(Kengne, 2000 cit. Letah, 2012). Les bactéries dans les systèmes de traitement biologique sont sujettes de prédation, et sont exposées aux substances inhibitrices sécrétées par d’autres bactéries, protozoaires et nématodes.

III.1.4. Performance épuratoire de la station d’épuration expérimentale des eaux usées du CHU

III.1.4.1. Performances physico-chimiques

Les performances épuratoires ont été appréciées sur la base du taux d'abattement enregistrées, pour les paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'affluent et de l'effluent de la STEP du CHU (Tableau IX). Les abattements ont été calculés pour chaque paramètre selon la formule suivante (El Haité, 2010 Cit. Fonkou, 2010):

$$\text{Abattement (\%)} = 100 - (C_s/C_e) \times 100 \text{ où}$$

C_s : Concentration à la sortie

C_e : Concentration à l'entrée

Dans l'ensemble, le pourcentage d'abattement physico-chimique se situe dans la gamme de 70 à 94%. Plus spécifiquement, on obtient par ordre de performance 92,06% de réduction de la DCO, suivie successivement de 94,3% (DBO₅), 82,8% (MES), 87,5% (NO₃⁻), 90,16% (NH₄⁺), 90,75% (PO₄³⁻) et 73,35% (CND) (Fig.13). Ces différentes performances, sont globalement satisfaisantes pour un ouvrage naturel d'épuration des eaux usées industrielles en région tropicale. En effet, d'après Agendia (2000), les abattements physico-chimiques supérieurs à 60% sont acceptables pour l'épuration des eaux résiduaires sous les climats chauds. Evaluation des performances de l'épuration par filtre plantés de roseau combiné au lagunage naturel montre une réduction considérable. En outre, un curage des bassins, et surtout du filtre planté de roseau contribuerait incontestablement à une amélioration des performances épuratoires physico-chimiques de la station.

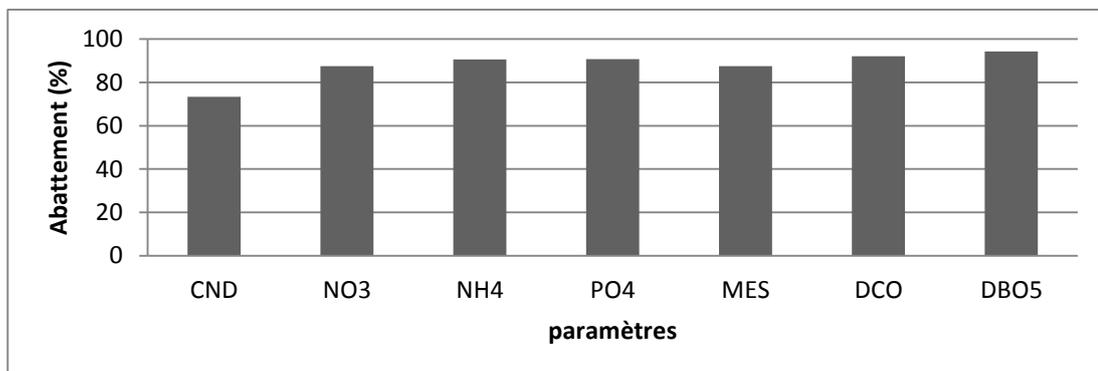


Fig. 13. Performance épuratoires physico-chimique de la station expérimentale.

III.1.4.2. Performances bactériologiques

L'abattement bactériologique obtenu dans la station d'épuration expérimentale des eaux du CHU (Fig.15) donne des performances variant entre 99,657 et 100 % correspondant à une moyenne de 99,7 % pour les CF et entre 99,9 et 100 % pour une moyenne de 99,9 % des SF. Ces résultats sont en accord avec les données relevées dans la littérature où les auteurs ayant

travaillé sur les performances épuratoires des systèmes naturels d'épuration montrent une grande réduction des germes de contamination fécales > 98 % (Kengne, 2000).

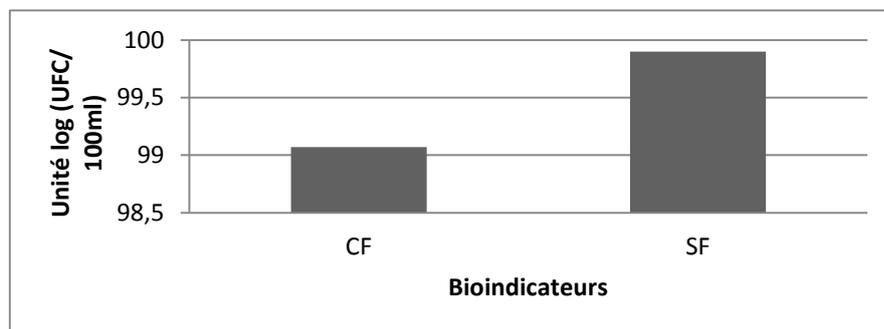


Fig.14. Performances épuratoires bactériologique de la station expérimentale.

L'élimination des micro-organismes indicateurs de la pollution fécale est considérable (Fig. 14). On note par rapport à l'affluent une baisse d'environ 3,8 unités log pour les SF et 3,2 pour les CF soit respectivement une performance de 99,957 et 99,610%. Cependant, ces performances sanitaires demeurent en-dessous de la valeur seuil de 10^4 bactéries/100ml édictée par l'OMS pour faire l'objet d'une utilisation non restrictive (Anonyme, 2008).

Tableau IX. Taux d'abattement des paramètres physico-chimiques et bactériologiques.

Paramètres	Concentration		Normes de rejet	Abattement (%)
	Entrée	Sortie		
CND ($\mu\text{S/cm}$)	$143,2 \pm 10,23$	$538 \pm 83,86$		73,4
MES (mg/l)	$111 \pm 17,31$	$19 \pm 3,69$		82,8
NO_3^- (mg/l)	$80 \pm 7,65$	$01 \pm 0,29$	≤ 30	87,5
NH_4^+ (mg/l)	$100,1 \pm 21,29$	$3,8 \pm 1,31$	≤ 30	96,16
PO_4^{3-} (mg/l)	$80 \pm 6,89$	$01 \pm 0,81$	≤ 10	92,1
DCO (mg/l)	$2240 \pm 209,72$	$150 \pm 32,21$	≤ 200	76,3
DBO_5 (mg/l)	$700 \pm 127,79$	$60 \pm 57,85$	≤ 50	94,3
CF (UFC/100 ml)	$7000 \pm 904,5$	$300 \pm 99,7$	≤ 2000	95,8
SF (UFC/100 ml)	$3000 \pm 465,2$	$100 \pm 91,5$	≤ 1000	96,7

La réduction significative de la teneur des différents bio-indicateurs dans l'effluent de l'entrée à la sortie de la station d'épuration expérimentale témoigne du pouvoir épurateur du

système reconstitué tant sur la plan physico-chimique que biologique. En effet, la décontamination majeure des effluents en charge bactérienne est assurée par les caractéristiques granulométriques, ainsi les bactéries retenues par filtration ou par adsorption subissent un dépérissement assuré par la microflore du sol (Morel, 2002).

Les charges de coliformes et des streptocoques fécaux respectivement 300 UFC/100 ml et 100 UFC/100 ml dans l'effluent à la sortie du système respectent les normes de rejet suggérées par le MINEPDED au Cameroun et restent en dessous de ces normes (≤ 2000 UFC/100 ml pour les CF et ≤ 1000 UFC/100 ml pour les SF) (Anonyme, 2008).

III.1.5. Analyse économique

Le coût de traitement des eaux usées du C.H.U de Yaoundé par une bache d'égalisation-neutralisation, une grille de prétraitement puis une station d'épuration à boues activées à laquelle est associé un compartiment de chloration et un lit de séchage des boues est fonction du volume d'eau à traiter, de son débit, de son acidité, de sa teneur en MES, du volume du bassin d'aération et du volume du lit de séchage (Eckenfelder, 1985). Il est estimé à 9.442.090 francs CFA par an (tableau X). Lorsqu'on y associe les frais d'entretien et de maintenance de la station à boues activées et du réseau de collecte, les coûts des pièces de rechange, de la consommation en électricité, le salaire du personnel d'entretien et le coût de l'assistance technique qui sont tous estimés par rapport à celui de l'ancien station à boues activées du CHU (Yaoundé), on se retrouve à près de 16.000.000 de francs CFA par an (tableau X).

Tableau X. Estimation du coût de traitement des eaux usées du C.H.U par les boues activées. (Eckenfelder, 1985).

Etape de traitement	Débit (m ³ /j)	Fonction de coût	Coût de traitement (francs CFA/ an)
Egalisation	66,944	Q=0.49=768.000	6.025.040
Dégrillage	66,944	Q=1.17=1.400	191.520
Boues activées	66,944	Q=0.87=68.200	2.643.345
Chloration	66,944	Q=0.97=7.000	413.085
Lit de séchage	66,944	Q=1.37=580	1.69.100
Sous-total 1	-	-	9.242.090
Electricité	-	-	250.000

Entretien et maintenance	-	-	3.000.000
Personnel et assistance technique	-	-	3.200.000
Sous-total 2	-	-	6.450.000
Total	-	-	15.892.090

Le coût de traitement des mêmes eaux par une grille de prétraitement puis une station à filtre planté de roseau combiné au lagunage à microphytes associée si possible à un compartiment de chloration et à un lit de séchage des boues est fonction des MES, du volume du décanteur-digesteur, du nombre de bassins de lagunage, du volume du lit de séchage des boues. Ce coût est estimé à 4.065.515 francs CFA par an (tableau XI). En y associant les frais d'entretien technique, on obtient un coût de fonctionnement annuel de 6.265.515 (tableau XI).

Tableau XI. Estimation du coût de traitement des eaux usées du C.H.U par le filtre planté de roseaux combiné au lagunage naturel.

Etape de traitement	Débit (m ³ /j)	Fonction de coût	Coût de traitement (francs CFA/ an)
Dégrillage	66,944	Q=1.17=1.400	191.520
Filtre planté de roseau	66,944	Q= 1.56=15.000	1.469.650
Lagunage	66,944	Q=1.13=12.000	1.291.810
Chloration	66,944	Q=0.97=7.000	413.085
Lit de séchage	66,944	Q=1.35=580	169.100
Sous-total 1	-	-	2.065.515
Salaire du personnel	-	-	1.200.000
Personnel et assistance technique	-	-	1.000.000

Sous-total 2	-	-	2.200.000
Total	-	-	4.265.515

Nous constatons par cette analyse que le coût total de traitement de la même eau usée par les boues activées est près de 4 fois plus élevé que celui du traitement par filtre planté de roseau combiné au lagunage à microphytes qui permet pourtant d'obtenir un résultat similaire ou même plus intéressant en ce qui concerne l'abattement de la DBO₅, de la DCO des éléments nutritifs et des substances indésirables.

III.2. DISCUSSION

La station d'épuration (STEP) du C.H.U qui été construite pour traiter les eaux usées qui seraient produites dans cet établissement hospitalier, dans la F.M.S.B et dans l'E.N.S.P est depuis plusieurs années abandonnée et se dégrade chaque jour un peu plus. Cette STEP a pourtant une capacité nettement suffisante pour le traitement des eaux usées des structures qui y sont raccordées. Son abandon est donc le résultat des pannes successives, du mauvais entretien et du manque de moyens financiers pour achat des pièces de rechange. Les eaux usées en provenance de cet établissement hospitalier sont donc déversées dans l'un des étangs de l'Université de Yaoundé I sans traitement. Ce déversement participe à la pollution, à la contamination, à l'eutrophisation des étangs de l'Université de Yaoundé I et constitue un risque grave de propagation de maladies d'origine hydrique dans la population dont une partie utilise les eaux de ces étangs à plusieurs fins dont agriculture, ménage, pisciculture. Cette pollution entraîne aussi la diminution de la biodiversité naturelle et l'introduction dans les chaînes trophiques des substances dangereuses comme les métaux lourds (Fonkou et *al.*, 2002).

Les eaux usées ainsi rejetées ont des paramètres physico-chimiques et microbiologiques supérieures aux normes appliquées dans plusieurs pays. De plus, elles renferment des substances chimiques dangereuses qui proviennent des laboratoires d'analyse, et des germes pathogènes liés à la contamination fécale, tel que le confirment les teneurs élevées en germes indicateurs.

L'une des raisons majeures pour lesquelles les STEP mécaniques existantes dans la ville de Yaoundé ont été abandonnées est le manque ou l'insuffisance de moyens financiers pour

assurer leur bon fonctionnement. Malgré les propositions faites depuis quelques années pour palier à ce dysfonctionnement des STEP mécaniques et résoudre le problème des eaux usées dans toute la ville de Yaoundé (Fonkou, 2000), le problème reste entier. Il est donc nécessaire d'estimer les coûts d'exploitation des systèmes envisagés et de penser à concevoir des systèmes efficaces et si possible encore moins onéreux. Pour ces raisons, la réhabilitation de la STEP à boues activées du C.H.U n'est pas nécessaire car cette opération serait très coûteuse à cause des équipements mécaniques à renouveler, ainsi que sa gestion et son entretien. Les eaux usées du C.H.U de Yaoundé, de la F.M.S.B, de l'E.N.S.P peuvent être épurées par un système hybride qui pourra exploiter efficacement les deux bassins d'aération de la station existante qui ont chacun un volume de 164 m³ et qui seront tout simplement vidangés et nettoyés puis utilisés pour la mise en place du premier système qui est celui du filtre planté de roseaux. Le volume total des deux bassins (328m³) étant très important par rapport au débit total (64 m³/j) d'eau qui arrive à la STEP. Le temps de séjour de l'eau dans le premier système sera long et permettra une bonne digestion anaérobie des matières organiques et inorganiques avant la phase du deuxième système qui est celui du lagunage. L'épuration se poursuivra dans les deux lagunes de 0,7 m de profondeur qui seront construites (Fig.15). Un compartiment de chloration pourra être mis en place pour désinfecter les eaux épurées avant leur rejet ou à défaut, une autre lagune de 0,7 de profondeur dans laquelle on ne cultivera aucune plante et pourra être mise en place pour permettre aux rayons ultra violet du soleil d'atteindre l'eau et de détruire les micro-organismes (Kengne, et *al.*, 2002). A la fin de ce procédé, l'eau épurée sera déversée dans l'environnement (l'étang Atemengue) sans grand danger. Le lit de séchage pourrait être aménagé pour permettre la mise en place autour de la STEP pour éviter les accidents.

Si un tel système est réalisé, il n'utiliserait aucune source d'énergie extérieure pour son fonctionnement, nécessitant au plus deux personnes pas très qualifiées pour assurer son fonctionnement et son entretien quotidien avec du matériel local peu coûteux. Un spécialiste en matière d'assainissement sera utile pour assurer la supervision du travail.

A l'état actuel, les étangs de l'Université de Yaoundé I qui sont envahis par les macrophytes participent à l'épuration des eaux usées qui y sont déversées par un abattement important des paramètres physico-chimiques. Néanmoins, certaines substances chimiques telles que les métaux lourds se propagent très certainement au-delà de l'étang Atemengue et se retrouvent dans des chaînes trophiques dans l'étang de Melen et au niveau de la station aquacole de Yaoundé (Fonkou et *al.*, 2002). En plus, il n'est pas exclu que la pollution microbiologique déversée dans les étangs de la retenue et Atemengue se trouve dans l'étang de Melen. Il est normal de penser que les substances indésirables telles que les métaux lourds se trouvent

rapidement dans les étangs en construction du fait de la faible distance entre les points de rejet et la zone considérée. Ces étangs sont aussi exposés à une importante pollution organique et microbiologique qui est à l'origine de l'envahissement des eaux par les plantes et de leur contamination.

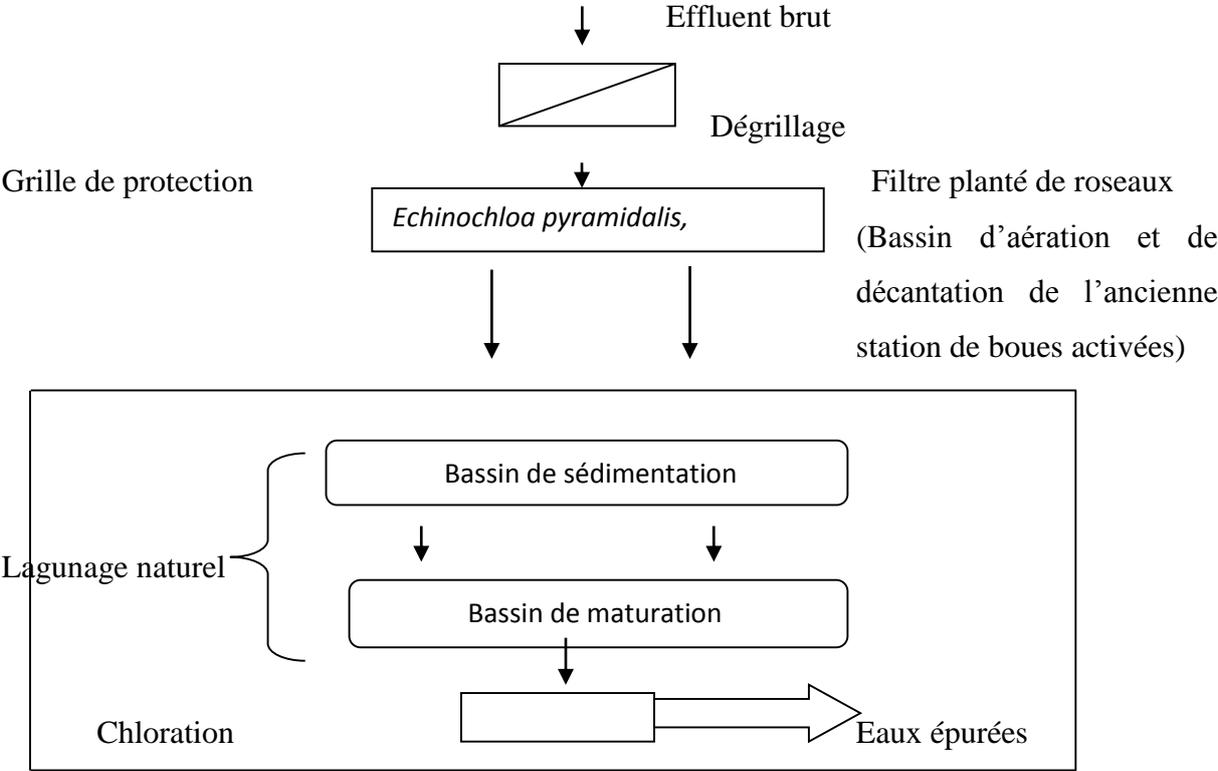


Fig. 15. Système hybride combinant les filtres plantés de roseaux au lagunage proposé pour l'épuration des eaux usées du C.H.U de Yaoundé.

CHAPITRE IV. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

IV.1 Conclusion

La station d'épuration (STEP) à boues activées qui a été construite pour traiter les effluents du C.H.U, de la F.M.S.B et de l'E.N.S.P est abandonnée depuis plusieurs années à l'image de plusieurs autres existantes dans le pays. Ceci entraîne le déversement d'eaux usées non traitées en provenance d'un établissement hospitalier dans un milieu aquatique. Les eaux du milieu récepteur sont utilisées en aval par des populations à diverses fins, malgré les risques de pollution, de contamination et de toxicité qu'elles présentent.

L'étude menée en vue de contribuer à la gestion efficace de ces eaux usées a permis d'évaluer puis d'estimer les coûts de leur traitement par le système envisagé.

Les eaux usées ainsi rejetées sont riches en polluants organiques ($DBO_5 = 190\text{mg/l}$) et ($DCO = 600,75\text{mg/l}$ en moyenne), en Matière en Suspension ($MES = 25,12\text{ mg/l}$ en moyenne), en éléments nutritifs ($PO_4^{3-} = 25\text{ mg/l}$ et $NO_3^- = 27\text{ mg/l}$ en moyenne). Elles contiennent aussi des substances chimiques dangereuses (métaux lourds, sels de métaux, acides, colorants), des micro-organismes pathogènes ou non dont certains sont indicateurs de la pollution (streptocoques fécaux $>3000\text{ UFC/100 ml}$, coliformes fécaux $>7000\text{UFC/100 ml}$). Au vu des effets néfastes de ces effluents sur l'environnement et sur l'homme (toxicité, eutrophisation, contamination des étangs récepteurs, contamination et pollution des nappes souterraines, propagation des maladies d'origine hydriques), ils devraient être épurés avant leur rejet.

D'où la mise en place d'une station pilote a permis une réduction efficace des différents polluants organiques ($DBO_5 = 60\text{mg/l}$; $DCO = 150\text{mg/l}$; $MES = 19\text{ mg/l}$; $NH_4^+ = 3,8$; $PO_4^{3-} = 01\text{ mg/l}$ et $NO_3^- = 01\text{ mg/l}$) et même bactériologiques (streptocoques fécaux $<300\text{ UFC/100}$; coliformes fécaux $<100\text{UFC/100 ml}$).

La réhabilitation de la station d'épuration du C.H.U ne serait pas la meilleure solution pour résoudre ces problèmes car la gestion et l'entretien de cette station sont très coûteux (environ 25.000.000 de francs CFA par an pour l'épuration des eaux usées du C.H.U) et la technologie utilisée nécessite un personnel hautement qualifié pour assurer son fonctionnement.

IV.2. Recommandations

Le système hybride décrit qui exploiterait une partie des infrastructures de l'ancienne station d'épuration pourrait être mis en place pour permettre l'épuration à coût beaucoup moins élevé (environ 6.300.000 francs CFA par an) pour le traitement des eaux usées du C.H.U avec un résultat aussi intéressant ou meilleur que dans le cas des boues activées.

Pour résoudre efficacement le problème d'eaux usées rejetées dans la nature sans traitement, le C.H.U devrait:

- Curer le réseau de collecte de ses eaux usées;
- Déceler les fuites et boucher toutes les fissures observées;
- Dégager les résidus de dégrillage et réinstaller la grille pour assurer le prétraitement des effluents;
- Vider la bêche qui reçoit les eaux usées des laboratoires et joindre la sortie de ces eaux au reste du réseau de collecte;
- Mettre en place le système de filtre planté de roseau combiné à un lagunage à microphytes proposé;
- Réhabiliter le lit de séchage des boues;
- Mettre en place un comité de gestion de cette station.

Les résultats obtenus dans le cadre du C.H.U de Yaoundé peuvent être exploités avec succès dans d'autres centres hospitaliers de même envergure qui fait face à des problèmes similaires dans le pays.

IV.3. Perspectives

Dû au manque de temps et de financement pour étendre les travaux de ce système expérimental de traitement dans le cas des eaux usées hospitalières du CHU, on n'a pas pu étaler notre étude à long terme. Des études ultérieures pourraient apporter une valorisation du système dans les déchets liquides hospitaliers. De plus, une étude pourra être à long terme menée à suivre des performances épuratoires de la station d'épuration hybride pour voir par exemple l'influence des saisons sur la qualité des eaux usées du CHU.

BIBLIOGRAPHIE

- Agendia P.L., Fonkou T., Sonwa D.; Mefenya R., Kengne N.I. Et Zambo A.J.M. 2000. Collecte, épuration et évacuation d'eaux usées dans les lotissements SIC And Economic Appraisal.(eds) Amley Inter Sciences. ELBS.p.241-263.
- Anonyme, 2000. Recherche et dénombrement des entérocoques: méthode par filtration sur membrane. Centre d'expertise en analyse environnemental du Québec, gouvernement du Québec. 27 p.
- Anonyme, 2000.programme fédérateur de recherche sur l'assainissement des eaux usées en Afrique subsaharienne. Financé par la Coopération Française à travers le programme CAMPUS, projet n° 96313119b.32p.
- Anonyme, 2001. procédés extensifs d'épuration des eaux usées dans les petites et grandes collectivités. 4-32p.
- Anonyme, 2002.Elimination des effluents liquides des établissements hospitaliers ; Recommandations. Institut Biomédical des Cordeiens Pub. Paris. 55p.
- Anonyme, 2005. Epuration des eaux uses domestiques par filtres plantés de macrophytes. Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse et Rhin Meuse. p. 8-16.
- Anonyme, 2008. Normes environnementales et procédure d'inspection des installations industrielles et commerciales au Cameroun. MINEP, Yaoundé. 138 p.
- Anonyme, 2008.Plan national de gestion des déchets hospitaliers. MINSANTE, Yaoundé. p.1-96.
- Ayo Anne, 2012.Evaluation des performances épuratoires de la station rénovée d'épuration des eaux usées du Camp-SIC Messa (Yaoundé).p. 12-40
- Barbault R. 1983.Abrégé d'écologie générale. Masson pub.Paris. 198p.
- Bassompierre C., 2007. Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers: de la conception d'un pilote à la validation de modèles. Thèse de Doctorat de l'INP (Institut National Polytechnique), Grenoble. 231 p.
- Baumont S., Camard J.P., Lefranc A. & Francon A., 2002. Réutilisation des eaux usées épurées: risques sanitaires et faisabilité en Ile de France, Paris. p 12 -29.
- Bechac J.P., Mercier B., Nuer P.1983. Traitement des eaux usées. EYROLE Pub.Paris 281p.
- Brossier G. et Dussaix A. M., 1999. Enquêtes et Sondages : méthodes, modèles, applicables, nouvelles approches. Dunod, Paris. 365 p.

- Cavicchi E., 2008. Service Public d'Assainissement non Collectif. Edition Pays de Clermontois. 18 p.
- Chedad K. et Assobhei O., 2007. Etude de la survie des bactéries de contamination fécale (coliformes fécaux) dans les eaux de la zone ostréicole de la lagune d'Oualidia (Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique 29: 71–79.
- Chevalier P., 2002. Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine :Entérocoques et streptocoques fécaux. Institut national de santé publique, Québec. 5 p.
- Clausen E. M., Green B. L. and Litsky W., 1977. Faecal streptococci: indicators of pollution. Edit. American Society for Testing and Materials (ASTM). pp 247-264.
- Cors M., 2007. Techniques extensives d'épuration des eaux usées domestiques. Dossier Inter-Environnement Wallonie. 43 p.
- De Villers J., Squilbin M. & Yourassowsky C., 2005. Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général. Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement. 16 p.
- Djermakoyé M. M. H., 2005. Les eaux résiduaires des tanneries et des teintureries: caractéristiques physico-chimiques, bactériologiques et impacts sur les eaux de surface et les eaux souterraines. Mémoire de Thèse, Faculté de Médecine, Pharmacie et d'Odonto-Stomatologie, Université de Bamako. 135 p.
- Eckenfelder, W.W. 1982. Gestion des eaux usées urbaines et industrielles : Caractérisation-Techniques d'épuration-Aspects économiques. Technique et documentation Lavoisier.Paris.496p.
- Fonkou T.,Agendia, P., Kengne, Y., Amougou A., and Nya J, 2002.The accumulation of heavy metals in biotic and abiotic components of the olezoa wetland complex in Yaounde-Cameroun(West-Africa).Proceeding of International Symposium on Environmental pollution control and Waste Management. 7-10 January 2002. Tunis (EPCOWM 2002),P.29-33.
- Frerotte J. et Verstrate W., 1989. Le traitement des Eaux Usées d'Hôpitaux, Technique de l'eau et de l'assainissement. P 23.
- Gaye M. et Niang S., 2002. Epuration extensive des eaux usées pour leur réutilisation dans l'agriculture urbaine: des technologies appropriées en zone sahélienne pour la lutte contre la pauvreté. Etudes et recherches, Dakar. P 17 .
- Habib et El Rhazi, 2007. Impact sanitaire de la réutilisation des eaux usées. Projet de fin d'études de License-SV, Université Cadi Ayyad Marrakech. 18 p.

- Howard G., Stephen P., 2003. Risk factors contributing to microbiological contamination of shallow groundwater in Kampala, Uganda. *Water Research* 37: 3421-3429.
- Kengne I.M., Amougou A., Soh E.K., Tsama V., Ngoutane M.M., Dodane P.H. and Kone D., 2008. Effects of faecal sludge application on growth characteristics and chemical composition of *Echinochloa pyramidalis* (Lam). Hitch. And Chase and *Cyperus papyrus* L. *Ecol. Eng* 34 (3): 233-242.
- Kengne I.N.M., 2000. Evaluation d'une station de lagunage à macrophytes à Yaoundé: performances épuratoires, développement et biocontrôle des Diptères Culicidae. Thèse Doctorat de 3^e cycle, Université de Yaoundé I. 138 p.
- Kengne N.I.M., 2000. Evaluation d'une station d'épuration des eaux usées domestiques par lagunage à macrophytes à Yaoundé. Performances épuratoires, développement et bio-contrôle des Diptères Culicidae. Thèse de troisième cycle, Université de Yaoundé I. pp. 86-88.
- Kengne N.I.M., 2008. Potentials of sludge drying beds vegetated with *Cyperus papyrus* L. and *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitchc & Chase for faecal sludge treatment in tropical region. Thesis Ph.D/Doctorat Degree in Plant Biology, Speciality: Phytoremediation. 114 pp.
- Koné D., 2002. Epuration des eaux usées par lagunage à microphytes et à macrophytes (*Pistia stratiotes*) en Afrique de l'Ouest et du centre : Etat des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement. Thèse 2653: 17-31.
- Letah N., 2011. charges hydrauliques et performances épuratoires des filtres plantes a *echinochloa pyramidalis* (lam.) hitchc. & chase dans le traitement du percolat des boues de vidange, 13-45p
- Liénard A., Cathérine B., Pascal M., Yvan R., François B. et Bernadette P., 2004. Filtres plantés de roseaux à flux vertical et lagunage naturel en traitement d'eaux usées domestiques en France: comparaison des performances et des contraintes d'exploitation en termes de pérennité et fiabilité. *Ingénieries n° special*. pp. 87-99.
- Mara D. D. et Cairncross S., 1991.** Appréhension des risques sanitaires liés à la réutilisation des eaux résiduaires et des excréta en agriculture et aquaculture. OMS/PNUE, Genève. 202 p.
- Martin,G.1985. Point sur l'épuration et le traitement des effluents (eau, air)2.1 Bactériologie des milieux aquatiques aspects écologiques et sanitaires. Technique et Documentation Lavoisier. Paris.

- Metcalf & Eddy, 1991. Wastewater engineering – treatment, disposal, reuse. Irwin/McGraw-Hill, London. 782 p.
- Miss F., 2007. Etude des possibilités de valorisation des produits issus de traitement des boues de vidange: cas de Yaoundé, Cameroun. Ecole National d'Enseignement Supérieur d'Agronomie de Dijon (ENESAD). 142 p.
- Montangero A. et Strauss M., 2002. Gestion des boues de vidange. Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux. EAWAG / SANDEC. 2^{ème} édition. 48 p.
- Morel M. A. et Kane M., 2002. Le lagunage à Macrophytes, une technique permettant l'épuration des eaux usées pour son recyclage et de multiples valorisations de la biomasse. Sud sciences et technologies, 1: 5-16.
- Ndiayé M. L., 2005. Impacts des eaux usées sur l'évolution chimique et microbiologique des sols: étude de cas à Pikine (Dakar – Sénégal). Mémoire D.E.S.S.N.E n° 110. Université de Lausanne. 102 p.
- Nya J., Brissaud F., Kengne I.M., Drakids C., Amougou A., Atangana E.R., Fonkou T., & Agendia P.L., 2002. Traitement des eaux usées domestiques au Cameroun: Performances épuratoires comparées du lagunage à macrophytes et du lagunage à microphytes. pp 726 – 736.
- Ramade F., 2005. Eléments d'Ecologie – Ecologie appliquée. Edition Dunod, Paris. 63 p.
- Stevik T.K., Kari A. Ausland G., Hanssen J.F., 2004. Retention and removal of pathogenic bacteria in wastewater percolating through porous media: a review. Water Research 38: 1355–1367.
- Strauss M., Heinss U., Montangero A., 2000. Planning for Research Protection in Faecal Sludge Management. In: Proceedings, Int. Conference Water, Sanitation & Health. IWA Publishing House and WHO Water Series. P. 34.
- Sy S. et Tall S. P., 2003. Etude de réhabilitation de la station d'épuration de Saly Portudal. Projet de fin d'étude. Ecole Supérieur Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 139 p.
- Taylor R., Aidan C., et al., 2004. The implications of groundwater velocity variations on microbial transport and wellhead protection. Review of field evidence. FEMS Microbiology Ecology 49: 17–26.
- Tchinda Y., 2000. Gestion et épuration des eaux usées hospitalières: cas du Centre Hospitalier et Universitaire (C.H.U) de Yaoundé. Mémoire de maitrise, Université de Dschang p 4-60

ANNEXES

Annexe 1. Normes de Rejet pour le Ministère de l'Environnement , de la Protection de la Nature et du Développement Durable (MINEPDED) .

Paramètres de pollution	Normes de rejet
DBO ₅	≤ 50 mg/l
DCO	≤ 200 mg/l
Azote	≤ 30 mg/l
Phosphore	≤ 10 mg/l
CF	≤ 2000 UFC/100 ml
SF	≤ 1000 UFC/100 ml
pH	6 - 9
Température	30 °C

Annexe 2. Evolution de la qualité physique de l'eau le long du système hybride. a. échantillons d'eau prélevés à l'entrée — sortie ; b. analyse des échantillons d'eaux au laboratoire.



Annexe 3. Composition des effluents de différents services hospitaliers et les risques associés.

Services	Divisions	Nature des effluents	Risques
Services cliniques	<ul style="list-style-type: none"> • Hospitalisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux de lavabos, bains, douches, W.C, détergents, décapants. 	Epidémique (certaines bactéries)
	<ul style="list-style-type: none"> • Balnéothérapie 	<ul style="list-style-type: none"> - Matière organiques, antiseptiques, micro-organismes, détergents, désinfectants 	infectieux
	<ul style="list-style-type: none"> • Bloc opératoire 	<ul style="list-style-type: none"> - Matières organiques, liquides biologiques (sang, urines, selles, liquide gastrique), détergents, solutions médicamenteuses. 	Infectieux et toxique pour le personnel, de contamination pour la nature.
	<ul style="list-style-type: none"> • Stérilisation centrale 	<ul style="list-style-type: none"> - Détergents, pré-détergents, détartrants, neutralisants, lubrifiants, vapeur d'eau des autoclaves 	Pas de risque particulier démontré
		<ul style="list-style-type: none"> - Produits biologiques (sang, crachats, urines, tissus), 	Infectieux et toxique pour l'homme et l'environnement

Services médico- techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratoires 	produits chimiques périmés, acides, bases, réactifs divers, solvant, cyanures, génotoxiques, formol, alcools, toluène, xylène, colorants, éther.	
	<ul style="list-style-type: none"> • Médecine nucléaire et laboratoires de radio-analyses 	- Sources non scellées de radio- isotopes à applications in vivo (Technétium 99m, Iode 123, Iode 131, Phosphore 32, Yttrium 90, Rhénium 186, Erbium 169) et in vitro (Iode 125, Carbone 14, Titrium)	Toxique pour l'homme et l'environnement
	<ul style="list-style-type: none"> • Radiologie 	- Bains de révélateurs usagés et de fixateurs usagés (composés d'Argent dissous, hydroquinone,...)	Toxique pour l'homme et pollution pour l'environnement
		- Principe actif pur ou en solution, médicaments	Mutagène, tératogène,

	<ul style="list-style-type: none"> • Pharmacie hospitalière 	périmés, liquide biologiques, acide péracétique.	carcinogène et génotoxicité.
Services généraux et logistiques	<ul style="list-style-type: none"> • Cuisines hospitalière 	- Nettoyants, et désinfectant +/- chlorés, dégraissants, liquide de rinçage, décapants, détartrants, savons.	Pas de toxicité particulière.
	<ul style="list-style-type: none"> • Blanchisserie 	- Tensioactifs, composés alcalins, agents de blanchiment, produits complexant, azurants optiques, agents anti bactériens, matières	Pas de risque spécifique
	<ul style="list-style-type: none"> • Service technique hospitalier 	- Acides, bases, solvants (acétone, trichloréthylène), colles, peintures, antigels, huiles de vidange, polychlorobiphéyles.	Toxicité pour l'homme et pollution pour l'environnement.

Annexe 4. Composition des eaux résiduaires en fonction du type d'industrie (Agendia 1995 ; Ndiayé, 2005).

Types d'eaux usées	Industries	Composants majeurs des effluents
Eaux usées inorganiques	- Minières	- Chlorures, acides, sulfates, sels de métaux, charbon.
	- Métallurgiques	- Métaux, ammoniac, cyanures, naphtalène
	- Ateliers électromécaniques	- Particules métalliques, résines, huiles, savons.
	- Raffineries	- Huiles, acides, hydrocarbures.
	- Automobile	- Acides, graisses, huiles, fer, sels.
Eaux usées organiques	- Agroalimentaires	- Substances organiques, acides, bases, graines.
	- Abattoirs	- Sang, entrailles, peaux, poils.
	- Textile	- Colorants, décolorants, huiles, crasse.
	- Pâte à papier	- Détritus, lignite, cellulose, fibres.
Eaux usées toxiques	- Certaines industries chimiques	- Produits chimiques toxiques.
Eaux chaudes	- Centrales électriques	

Annexe 5. Quelques germes pathogènes liés aux eaux usées et les maladies qu'ils engendrent (AGENDIA et al., 1995).

Groupes	Microbes	Maladies
Bactéries	<i>Salmonella spp.</i>	Fièvre typhoïde, Fièvre paratyphoïde, Salmonellose.
	<i>Campilobacter spp.</i>	Entérite, Diarrhée.
	<i>Shigella</i>	Dysenterie bactérienne.
	<i>Escherichia coli</i>	Gastro-entérite.
	<i>Vibrio cholerea</i>	Choléra, Entérite.
	<i>Leptospira spp</i>	Leptospirose.
	<i>Mycobacterium spp</i>	Tuberculose.
	<i>Clostridium spp</i>	Tétanos, Gangrène.
	<i>Brucella tularensis</i>	Tularaenie
Virus	<i>Polyvirus</i>	Poliomyélite, Entérite
	<i>Coxackies virus A</i>	Courbatures musculaires.
	<i>Coxackies virus B</i>	Méningite.
	<i>Echovirus</i>	Diarrhée, Hépatite.
	<i>Adénovirus</i>	Infections respiratoires, Attaque du système nerveux central
	<i>Réovirus</i>	Infections respiratoires, Diarrhée, Hépatite.
	<i>Hépatite A</i>	Hépatite infectieuse.
Protozoaires	<i>Entamoeba histolitica</i>	Dysenterie amibienne.

	<i>Giardia intestinalis</i>	Giardiase .
	<i>Balantridium coli</i>	Balantidiase .
Helminthes	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariase .
	<i>Ankylostoma duodenale</i>	Ankylostomiase.
Cestodes	<i>Taenia spp.</i>	Cysticercose, Taeniase.

Annexe6. Effets de certaines substances toxiques susceptibles de se retrouver dans les eaux usées sur l'homme (DONGMO, 1995; FONKOU, 1996).

Substances	Effets	Seuil de toxicité
Plomb	Retard mental, troubles de comportement et neurologiques.	0,05-0,1 mg/l
Argent	Troubles digestifs, coloration grise de la peau.	0,05 mg/l
Arsenic	Troubles digestifs, trouble du métabolisme glucido-lipidique, cancers cutanés.	0,05 mg/l
Baryum	Poison du myocarde et des parois vasculaires.	1 mg/l
Cadmium	Troubles rénaux altération et décalcification osseuse, protéinurie et glycosurie.	0,005 mg/
Chrome	Action toxique hépato-rénale, cancérigène.	0,05 mg/l
Cyanures	Inhibiteur enzymatique mortel.	0,001-0,2 mg/l
Fluor	Altérations dentaires, manifestations gastro-intestinales.	1,4-2,4 mg/l
Mercure	Troubles digestifs, stomatite, atteinte rénale.	0,15-0,5 mg/l
NO ₃ ⁻	Méthémoglobinémie infantile.	45 mg/l

Benzène	Leucémie et désordres sanguins chroniques.	1 ppm
---------	--	-------

Annexe 7. Fonctions de coût de traitement d'eaux usées urbaines (ECKENFELDER, 1982).

Procédé	Fonction (coût en Franc CFA)	Débit (m ³ /jour)
Prétraitement	1.400	1,17
Egalisation des débits	768.000	0,49
Décantation primaire	5.300	1,04
Boues activées	68.200	0,87
Disques biologiques	65.000	0,92
Filtration	72.800	0,84
Clarification	10.600	1,01
Traitement chimique	100	1,68
Bassin de stabilisation	10.200	1,27
Lagune aérée	12.000	1,13
Chloration	7.000	0,97
Réaération	7.200	0,91
Traitement des boues	220	1,36
Déshydratation mécanique	200	1,61
Séchage à l'air	580	1,35
Incinérateur	600	1,33

Annexe 8. Résumé des appareils et des méthodes utilisées pour la caractérisation physico-chimique et bactériologique des percolats.

Paramètres	Appareils	Méthodes
pH	pH mètre HACH	Electrode (lecture directe)
Température (°C)	Conductimètre HACH	Electrode (lecture directe)
CND (µS/cm)	Conductimètre HACH	Electrode (lecture directe)
TDS (mg/l)	Conductimètre HACH	Electrode (lecture directe)
DCO	-Mixer, Réacteur de DCO, Spectrophotomètre Hach DR/2010	Digestion au réacteur puis lecture à 620 nm.
DBO ₅	Appareil à DBO ₅	Manométrie
P (mg/l)	Spectrophotomètre HACH DR/2010	Molybdovanadate (lecture à 430 nm)
NH ₄ ⁺	-Spectrophotomètre HACH -Distillateur HACH	Nessler (lecture à 425 nm)
NO ₃ ⁻	Spectrophotomètre HACH	Nitra ver 5 nitrate (lecture à 400 nm)
NO ₂ ⁻	Spectrophotomètre HACH	Nitra ver 3 nitrite (lecture à 507 nm)
Salinité	Conductimètre HACH	Electrode (lecture directe)
Potentiel redox	pH-mètre HACH	Electrode (lecture directe)
Streptocoques fécaux	Colonne de filtration, incubateurs	Filtration sur membrane et incubation sur milieu BEA
Coliformes fécaux	Colonne de filtration, incubateurs	Filtration sur membrane et incubation sur milieu TTC et tergitol

Annexe 9. Analyse comparative des différentes technologies de traitement des déchets liquides.

Système de traitement	Installation et fonctionnement	Performance Technique	Coûts (investissement et entretien)	Recommandation pour le Cameroun
Fosses Septiques (stabilisation, décantation et digestion)	- curage des boues - nécessite peu de surface	Moyenne	Peu élevé	HD, CMA et CSI
Puisards avec poste de neutralisation	- nécessite assez peu de surface	Passable	faibles	HD, CMA et CSI
Traitement biologique (Système à boues activées)	- dégrillage - curage des boues - ventilation	Très élevée	Elevés	Peut être envisagé pour les HG, HC et HR, mais nécessite un traitement physico-chimique

	- nécessite surface assez importante			
Traitement biologique (disques biologiques, Lits bactériens, etc.)	- dégrillage - curage des boues - nécessite surface assez importante	Elevée	Elevées	Pas recommandé
Traitement Physico-chimique	- dégrillage - produits chimiques - nécessite surface assez importante	Très élevée	Elevées	Peut être envisagé pour les HG, HC et HR, mais nécessite une désinfection
Désinfection Chimique	- utilisation de produits chimiques - peu de surface - pas d'investissements en infrastructures	Elevé	Moyens	Recommandé pour tout système de traitement des eaux usées

Annexe 10. Proposition de systèmes de traitement par type de formation sanitaire.

Hôpital Général (HG)	Hôpital Central (HC)	Hôpital Privé (HC)	Hôpital de district (HD)	Centre Médical d'Arrondissement (CMA)	Centre de Santé Intégré (CSI)
Station d'épuration avec un traitement physicochimique et biologique			fosse septique, et/ou Puisards avec poste de neutralisation		