

## **Développement d'un logiciel de dimensionnement des stations d'épurations des eaux usées par traitements biologiques**

Mamisoa Lalaina RAZAFITSIATOSIKA

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

Equipe d'Accueil Doctorale : Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières

Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo

[mtsiatosika@gmail.com](mailto:mtsiatosika@gmail.com)

Marie Hanitriniaina RATSIMBA

Equipe d'Accueil Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo

[marie.ratsimba@univ-antananarivo.mg](mailto:marie.ratsimba@univ-antananarivo.mg)

Rijalalaina RAKOTOSAONA

Equipe d'Accueil Ingénierie des Matériaux et des Matières Premières

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo

[rijalalaina.rakotosaona@univ-antananarivo.mg](mailto:rijalalaina.rakotosaona@univ-antananarivo.mg)

Auteur correspondant : Mamisoa Lalaina RAZAFITSIATOSIKA, [mtsiatosika@gmail.com](mailto:mtsiatosika@gmail.com)

### **Résumé**

A Madagascar, la grande majorité des eaux usées sont directement rejetées dans l'environnement, sans traitement adéquat, ce qui a des effets néfastes sur la santé humaine, la qualité des ressources d'eau douce et les écosystèmes. Les causes en sont nombreuses, entre autres le coût élevé des traitements. Les traitements biologiques résoudraient ce problème. Toutefois, l'efficacité de ce type de traitement dépend de plusieurs paramètres, à commencer par un dimensionnement correct des différentes unités de traitement. Ainsi, l'objectif de cette étude est le développement d'un logiciel de dimensionnement des stations d'épuration des eaux usées par lits bactériens pour avoir la précision et gagner du temps pour la mise en place des traitements biologiques. Des modèles analytiques, empiriques et numériques issus des littératures scientifiques ont été utilisés. Les équations de base de dimensionnement de lits bactériens ont été déduites. Les résultats théoriques obtenus de ces équations ont été ensuite validés expérimentalement en traitant les eaux usées domestiques d'un campus universitaire. Après validation, le logiciel a été conçu sous Python. Les principaux paramètres d'entrée sont la quantité et le débit des eaux usées ainsi que les charges

polluantes. Les principaux paramètres de sortie sont les différentes dimensions du lit bactérien. Le logiciel pourrait être appliqué pour le dimensionnement des différents procédés de traitements biologiques des eaux usées comme le procédé Rhizopur, le procédé Azoé et le lit bactérien classique avec pouzzolane. Ce logiciel contribuerait à réduire la durée de l'étude ainsi que de la réalisation des projets de station d'épuration d'eaux usées et constituerait un outil d'aide de prise de décisions.

**Mots-clés :**

Dimensionnement, eaux usées, lits bactériens, logiciel, modèles, python, station d'épuration

**Abstract**

In Madagascar, the vast majority of wastewater is directly discharged into the environment without proper treatment, which has harmful effects on human health, the quality of freshwater resources, and ecosystems. There are numerous causes for this, including the high cost of treatments. Biological treatments could resolve this issue. However, the effectiveness of such treatments depends on several factors, starting with the correct sizing of the various treatment units. Thus, the objective of this study is to develop a software tool for sizing wastewater treatment plants using bacterial beds to ensure accuracy and save time in implementing biological treatments. Analytical, empirical, and numerical models derived from scientific literature have been used. The basic sizing equations for bacterial beds have been deduced. The theoretical results obtained from these equations were then experimentally validated by treating domestic wastewater from an University campus. After validation, the software was developed using Python. The main input parameters are the quantity and flow of wastewater, as well as pollutant loads. The main output parameters are the various dimensions of the bacterial bed. The software could be applied to the sizing of different biological wastewater treatment processes, such as the Rhizopur process, the Azoé process, and the classic bacterial bed with pouzzolane. This software would contribute to reducing the duration of studies and the implementation of wastewater treatment plant projects, and would serve as a decision-support tool.

**Key-words:**

Bacterial beds (trickling filters), dimensioning, logical (software), models, python, wastewater, wastewater treatment plant.

**1- Introduction**

L'eau est indispensable pour la survie, l'industrie et le développement de la société moderne. La plupart des activités humaines qui utilisent de l'eau, produisent des eaux usées qui ont des effets néfastes sur la santé humaine et la qualité des ressources d'eau douce (En-Nawaoui, 2010). Les lits bactériens sont une des premières techniques utilisées en traitements biologiques (Virloget, 2002) des eaux usées pour résoudre

ce problème. Ces lits bactériens consistent à faire supporter les micro-organismes épurateurs par des matériaux poreux ou caverneux. L'eau à traiter est dispersée en tête de réacteur, et traverse le garnissage (Touafek, 2015). Ce type de traitement biologique est un choix intéressant en raison de son coût énergétique faible et son exploitation facilitée (Elomari et Zarrouk, 2020), par rapport à la technique de boue activée classique par exemple (Merizak, 2020). La présente recherche s'intitule : « **Développement d'un logiciel de dimensionnement des stations d'épuration des eaux usées par traitements biologiques, cas des lits bactériens et filtres plantés** ». Deux principaux contextes justifient la création de ce logiciel. A Madagascar, d'une part, l'accroissement démographique et l'évolution de l'industrie engendrent un volume d'eaux usées de plus en plus important, accentuant la pollution d'eau dans certaines villes, surtout à Antananarivo, avec des impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine. D'autre part, sur le plan scientifique, la conception et le dimensionnement d'unité de l'épuration d'eaux usées requièrent de nombreux calculs complexes et sont chronophages. Les objectifs de notre étude sont alors de résoudre ces problèmes de pollutions des eaux usées et de calcul de dimensionnements via le développement d'un logiciel de dimensionnement des stations d'épuration des eaux usées par traitements biologiques, cas des lits bactériens et filtres plantés.

## 2- Méthodes et Matériels

### 2.1- Démarche à suivre

Notre démarche comprend : Modélisation, Expérimentation, Validation et Application. Pour les modélisations, nous avons fait la recherche bibliographique, la collecte et la synthèse des modèles empiriques et analytiques des revues scientifiques, la conception de modèle à utiliser pour dimensionner les lits bactériens, et la transformation des modèles empiriques et analytiques en modèles numériques. Le tableau 2 montre les types des modèles empiriques et analytiques utilisés avec les formules des modélisations. Des modèles empiriques et analytiques issus des littératures scientifiques ont été utilisés pour dimensionner les lits bactériens et les filtres plantés (Elomari et Zarrouk, 2020 ; Merizak, 2020 ; Yasmine ; Tchutchoua, 1990 ; Nicolas et Vasel, 1990 ; Drapeau et Jankovic, 1977). Les formules de ces modèles empiriques et analytiques (Roesler and Smith, 1969 ; Schulze, 1960 ; Vandevenne, 1984 ; IRCHA, 1982 ; DINEPA, 2012 ; Bernet, 2012 ; Toure, 1986 ; Velz, 1948) ont été transformées en codes et interfaces dans le langage de programmation Python pour obtenir les modélisations numériques.

Les travaux effectués dans le cadre de l'étude expérimentale concernent la conception des équipements pour le lit bactérien traditionnel et le filtre planté. Les essais expérimentaux ont été réalisés au Laboratoire de Recherche en Matériaux, Procédés et Génie Civil de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Les analyses des eaux avant et après traitement ont été effectuées au Laboratoire Qualité Eau de la JIRAMA à Mandrozeza Antananarivo.

Les résultats théoriques obtenus des modèles empiriques et analytiques par les lits bactériens et les filtres plantés ont ensuite été validés à partir des données expérimentales et du modèle numérique du logiciel. Ces données sont les résultats des prélèvements et des analyses des eaux usées avant et après traitement par lit bactérien et filtre planté.

L'application est faite avec les eaux usées du Campus Universitaire Résidentiel (CUR) de Vontovorona-Antananarivo. Le réseau d'assainissement de CUR est séparatif. La structure des réseaux d'eaux usées est composée par : 45 regards, 28 fosses avec de mâchefer, 7 puisards et un regard final. Des fuites d'eau potable sont constatées au niveau des robinets, vannes et tuyauteries dans les campus, engendrant des eaux claires parasites. Les CUR de Vontovorona habitent des 2900 étudiants qui sont répartis sur 30 blocs. Le volume des rejets journaliers est de  $164,7\text{m}^3/\text{j}$ .

## **2.2- Expérimentation**

L'objectif de notre expérimentation est la validation du modèle empirique de fonction exponentielle, qui va être utilisé dans le logiciel STEPLIBA .

### **2.2.1- Dispositif expérimental du lit bactérien**

Le lit bactérien traditionnel comprend un bac de stockage de l'eau à traiter, un filtre bactérien et un sprinkler. La conception et la réalisation du lit bactérien ont comporté trois étapes. Tout d'abord, nous avons construit le bac de stockage de l'eau à traiter. Ce bac est en plastique, muni d'une vanne pour assurer l'évacuation de l'eau filtrée et réguler le temps de séjour dans le filtre, ainsi que d'un tuyau pour relier les deux bacs et assurer le transfert de l'eau du bac de stockage vers le bac contenant le lit bactérien. Ensuite, nous avons construit le filtre bactérien. Les composants de ce filtre sont : un bac en plastique pour contenir l'eau et constituer le corps du filtre, des tuyaux, une vanne d'arrêt, ainsi que de la pouzzolane, qui sert de couche filtrante ou de support pour le lit bactérien. Notre pouzzolane provient d'un gisement situé à Betafo Antsirabe. Enfin, nous avons réalisé le sprinkler. Pour cela, nous avons utilisé deux tuyaux perforés, un coude en T, un moteur pour faire tourner le sprinkler, un potentiomètre pour ajuster la vitesse de rotation du sprinkler, et un interrupteur pour régler le débit d'eau à filtrer. Après l'assemblage, l'installation dans la figure 1 a été obtenue. Le tableau 3 nous donne les valeurs théoriques de dimensionnement du lit bactérien et les valeurs pendant la réalisation de l'expérience. D'après notre calcul issue de notre modélisation dans le tableau 3, la surface nécessaire du lit bactérien est de  $0,081\text{m}^2$  (valeur expérimentale), avec un volume de  $0,025\text{m}^3$  (valeur expérimentale).

### **2.2.2- Dispositif expérimental du filtre planté**

Le dispositif expérimental du filtre planté comprend un bac en plastique de stockage de l'eau à traiter, des tuyaux, deux vannes pour régler le débit d'entrée de l'eau à traiter et le débit de sortie de l'eau traitée. La plante utilisée pour le filtre planté est le *Phragmite communis*, également connu sous le nom de roseau commun. Il est une plante vivace appartenant à la famille des *Poaceae*. Le tableau 4 nous donne les valeurs théoriques de dimensionnement du filtre planté et les valeurs pendant la réalisation de l'expérience. D'après notre calcul issue de notre modélisation dans le tableau 4, la dimension de ce filtre est composée de la hauteur du Galets de 6.8cm, du gravier grossier 6.8cm, du gravier fin de 20.5cm et de revanche de 3,4cm. Le volume du filtre planté est de 0,03m<sup>3</sup>. Ce dispositif nous présente dans la figure 2.

### 2.2.3-Matériels au Laboratoire

Les étapes de traitement de l'eau au cours de cette étude sont : le traitement physique (filtration et décantation) et le traitement biologique (lit bactérien, filtre planté). Les échantillons d'eau ont été analysés avant et après traitement. Les analyses physiques ont été effectués à l'aide de divers instruments de mesure et de lecture directe des résultats tels que l'ionomètre de marque METTLER TOLEDO pour la mesure du pH, le conductimètre 7110 Ionolab WTW pour la mesure de la conductivité et de la température, le turbidimètre 2100 Q de marque HACH pour mesurer la turbidité, et le colorimètre DR 890 pour quantifier les Matières En Suspension contenues dans les échantillons d'eau. Les analyses chimiques des échantillons (ammonium ( $NH_4^+$ ), nitrates ( $NO_3^-$ ) et nitrites ( $NO_2^-$ )) ont été réalisées à l'aide du spectrophotomètre UV/Visible 31 SCAN, de marque ONDA, par les méthodes colorimétriques. Les analyses de pollution organique (demande biologique en oxygène (DBO) et demande chimique en oxygène (DCO)) ont effectuées à l'aide du DBO-mètre de marque OxiTop Box WTW et via la méthode au dichromate pour la DCO.

## 2.3- Conception du logiciel de dimensionnement des stations d'épurations des eaux usées par traitements biologiques

Le déroulement de la conception de ce logiciel est constitué par le choix de langage et l'organigramme.

### 2.3.1- Choix de langage

Le langage de programmation du Python est un langage de script du système d'exploitation Amoeba (1990) (Marvie, 2012). Ce langage a été développé en 1989 par Guido Van Rossum, aux Pays-Bas (Swinnen, 1987), à l'Université d'Amsterdam et nommé par rapport au Monthly Python's Flying Circus (Fuchs et Poulain, 2024). Lors de la création de la Python Software Foundation, en 2001, et durant les années qui ont suivi, ce langage est passé par une suite de versions que l'on a englobées dans l'appellation Python 2.x (2.3, 2.5, 2.6...). Depuis le 13 février 2009, la version 3.0.1 est disponible, de même que la

version 3.12.9. Ce langage est un langage Open Source supporté, développé et utilisé par une large communauté. Nous avons utilisé la version 3.7. 32-bit de ce langage Python pour le développement d'un logiciel de dimensionnements des stations d'épurations des eaux usées par traitements biologiques car c'est un langage de programmation interprété, à ne pas confondre avec un langage compilé. Les instructions que nous lui envoyons sont « transcrites » en langage machine au fur et à mesure de leur lecture. Les avantages de ce langage sont la simplicité et la portabilité. En outre, c'est un langage de programmation généraliste. Il offre un environnement complet de développement comprenant un interpréteur performant et de nombreux modules. Un atout indéniable est sa disponibilité sur la grande majorité des plates formes courantes. De plus, il est un langage de programmation facile à apprendre, à lire, à comprendre et à écrire, portable (Monbet, 2017), adapté aussi bien pour des scripts, des petits ou gros projets, doté d'une façade objet bien conçue et puissante, et possède une communauté active autour du langage. Enfin, il permet de créer toutes sortes de programmes, comme des logiciels, des progiciels, des jeux, etc... Il est possible d'associer des bibliothèques afin d'étendre ses possibilités.

### **2.3.2- Organigramme et conception du logiciel**

Pour notre étude, nous avons choisi l'organigramme général des procédés utilisés. Cet organigramme nous présente dans la figure 3.

L'utilisation des différents outils de langage de programmation du Python nous a permis d'élaborer le logiciel de développement. Ce logiciel couvre les différents procédés de traitement biologique des eaux usées : Procédé de Rhizopur, Procédé d'Azoé, Procédé des lits bactériens précédés par étangs anaérobies et Procédé des lits bactériens classiques. Plus concrètement, il permet de :

- calculer les consommations en eaux journalières, les productions des eaux usées, les débits à l'entrée de la STEP et les charges polluantes à partir de données de base,
- calculer les dimensions des ouvrages de la STEP (Prétraitements, Station de relevage, Traitement primaire, Traitement secondaire, et Traitement et Valorisation de boues),
- Chaque étape du processus d'épuration est présentée avec ses paramètres spécifiques.

Les étapes pour obtenir ce logiciel sont :

- La saisie des codes des procédés pour obtenir les modélisations numériques,
- La création d'interfaces qui constituent des fenêtres et des menus.

## **3- Résultats et interprétations**

### **3.1- Modélisations**

#### **3.1.1- Conception de modélisation utilisée en lit bactérien**

Cette conception est basée sur les modèles existants. Ces modèles sont fondés sur le rapport ( $p$ ) de concentration de substrat final ( $S_t$ ) sur initial ( $S_o$ ). Ce rapport est présenté par  $\frac{S_t}{S_o} = p$ . En combinant les formules des modélisations dans le tableau 2, nous avons conçu le nouveau modèle suivant :

$$p = \frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times A_s^b \times \frac{H^\alpha}{C_{hs}^n}} \text{ avec } K = k_T \times A_s^b \quad (6)$$

Ce nouveau modèle est un modèle empirique de fonction exponentielle. La valeur  $b$  varie de 0 à 1 ( $0 \leq b \leq 1$ ). La valeur  $\alpha$  est comprise entre 0 à 1 ( $0 < \alpha \leq 1$ ). La valeur  $n$  désigne le coefficient de remplissage qui varie de 0 à 1 ( $0 < n < 1$ ).

### 3.1.2- Modélisation numérique : Présentation du logiciel

La figure 4 ci-dessous présente le logiciel qui porte le nom de « **STEPLIBA** ». La fenêtre principale affiche les différents types de procédés : Procédé de Rhizopur, Procédé d'Azoé, Procédé des lits bactériens précédés par les étangs anaérobies et les procédés des lits bactériens. En cliquant sur chaque procédé, on obtient les différentes fonctionnalités : Consommation en eaux, Production en eaux usées, Débits des eaux usées, Charges polluantes, Prétraitements, Traitements primaires, Traitements secondaires, Traitements et Valorisations des boues, et Coûts d'investissements et d'exploitations. Les données d'entrée nécessaires au dimensionnement sont : Nombre d'habitants, Taux de raccordement, Consommation spécifique en eau, Taux de rejet, Taux de dilution, Ratio de charges polluantes, Vitesse de passage à travers la grille, Coefficient de Colmatage, Epaisseur et Espacement des barreaux, Rendement d'élimination de  $\text{DBO}_5$ , Constante de biodégradabilité, Température des eaux usées, Surface spécifique, Hauteur de garnissage, Charge massique des lits, les hauteurs des massifs filtrants, etc... Le logiciel nous donne : Consommation en eau journalière, Production des eaux usées, Débits d'eaux usées, Concentrations des charges polluantes, Dimensionnement des ouvrages tels que : prétraitements (*dégrilleurs, dessableurs, dégraisseurs*), traitement primaire (*étangs anaérobies, décanteur primaire, décanteur-digesteur*), traitement secondaire (*lit bactérien, filtres plantés, clarificateur*), etc...

### 3.2- Expérimentations

Le tableau 5 nous donne les résultats d'analyses des eaux usées brutes et des eaux usées traitées avec les abattements des différents paramètres après traitement. Ces abattements montrent l'efficacité de nos traitements. Nous pouvons en déduire que les dimensions de notre lit bactérien et du système de filtre planté, obtenues par nos modèles et notre logiciel sont donc validées.

### 3.3- Validation expérimentale du logiciel STEPLIBA

#### 3.3.1- Pour le procédé Lit bactérien

Pour valider notre logiciel nous avons mené nos expériences avec les eaux usées du campus CUR VONTOVORONA avec une installation à l'échelle laboratoire du procédé Lit bactérien. Le tableau 6 montre les résultats des eaux brutes et des eaux traitées par le procédé de lit bactérien, comparées par les valeurs théoriques du STEPLIBA et à la norme de rejet Malgache (Ministère de l'Environnement des Eaux et Forêts et du Tourisme, 2003). Nous constatons qu'il n'y a pas de grande différence entre les valeurs des DCO, de la DBO<sub>5</sub>, du MES obtenues expérimentalement et celles issues de notre logiciel. Nous en déduisons la validation de notre logiciel pour le procédé de lit bactérien.

### 3.3.2- Pour le procédé de filtre planté

Pour valider notre logiciel nous avons mené nos expériences avec les eaux usées du campus CUR VONTOVORONA avec une installation à l'échelle laboratoire du procédé de filtre planté. Le tableau 7 montre les résultats des eaux brutes et des eaux traitées par le procédé de filtre planté, comparées par les valeurs théoriques du STEPLIBA et à la norme de rejet Malgache (Ministère de l'Environnement des Eaux et Forêts et du Tourisme, 2003). Nous constatons qu'il n'y a pas de grande différence entre les valeurs des DCO, de la DBO<sub>5</sub>, du MES obtenues expérimentalement et celles issues de notre logiciel. Nous en déduisons la validation de notre logiciel pour le procédé de filtre planté.

### 3.4- Essai d'application du logiciel

Nous avons appliqué le logiciel pour le dimensionnement d'une STEPLIBA avec le procédé Rhizopur. Ce procédé de Rhizopur est un assemblage de procédé de lit bactérien et de filtres planté. Les eaux usées utilisées sont celles du campus CUR VONTOVORONA. Le tableau 8 donne les données à entrer dans le logiciel et les données de sortie.

## 4- Discussions

Si l'on compare ce nouveau modèle avec les modèles existants des revues scientifiques (Tchutchoua, 1990 ; Schulze, 1960 ; Vandevenne, 1984 ; IRCHA, 1982 ; DINEPA, 2012 ; Bernet, 2012 ; Toure, 1986 ; Velz, 1948) dans le tableau 2, notre nouveau modèle permet d'avoir les modèles existants en variant les paramètres :

- Si  $b = 0$  ;  $\alpha = 1$  et  $n = 0,5$  : On obtient le modèle de Schulze (Schulze, 1960):

$$\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_T \times H}{\sqrt{\frac{Q}{A}}}} \quad (1)$$

- Si  $b = 1$  ;  $\alpha = 1$  et  $n = 1$  : On obtient le modèle de Vandevenne, de Plug-Flow théorique, et al., comme suit (Vandevenne, 1984 ; IRCHA, 1982):

$$\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_T \times A_s \times H}{C_{hs}}} \quad (2)$$

- Si  $b = 1$  et  $\alpha = 1$  : On obtient les modèles de DINEPA (DINEPA, 2012) et de Nicolas Bernet (Bernet, 2012) comme suit :

$$\frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times A_s \frac{H}{C_{hs}^n}} \quad (3)$$

- Si  $b = 1$  ; la valeur ( $\alpha$ ) varie de 0,753 (quartz) et de 0,757 (latérite) et la valeur ( $n$ ) varie de 0,727 (quartz) et de 0,711 (latérite). On obtient les modèles de C.S. Toure (Toure, 1986) et de S.K. Tchutchoua (Tchutchoua, 1990), comme suit :

$$\frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times \frac{A_s \times H^\alpha}{C_{hs}^n}} \quad (4)$$

- Si  $b = 1$  ;  $\alpha = 1$  et l'inverse de la fonction exponentielle, on obtient le modèle de Velz (Velz, 1948) comme suit :

$$\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{e^{\frac{k_T \times A_s \times H}{C_{hs}^n}}} \text{ avec } k_T = k_{20} \times \theta^{T-20} \quad (5)$$

Le résultat de la modélisation numérique consiste en la présentation de ce logiciel. Si l'on compare les résultats de notre modélisation avec ceux des autres auteurs, à titre d'exemple l'ouvrage de M. Merizak (Merizak, 2020), les ressemblances concernent l'objectif et la méthodologie. Les objectifs du travail de M. Merizak (Merizak, 2020) sont de recenser les formules déjà publiées concernant les lits bactériens après avoir étudié leur fonctionnement, de dresser les algorithmes de dimensionnement pour les méthodes les plus utilisées, puis de les programmer afin d'élaborer un logiciel simple à utiliser pour dimensionner les différents types de lits bactériens, épargnant ainsi le calcul fastidieux à la main. Ces objectifs sont les mêmes que ceux de notre étude. La méthodologie au niveau des modélisations est également similaire. La démarche suivie par M. Merizak (Merizak, 2020) est la recherche bibliographique (Schulze, 1960 ; Eckenfelder, 1961 ; German ATV Rules et Standards, 2001 ; Racault et Seguret, 2004 ; Rankin, 1953), la collecte et la synthèse des formules semi-empiriques des revues scientifiques et la transformation des modèles semi-empiriques en modèles numériques. Les différences se situent au niveau des méthodes et des matériels, des formules semi-empiriques utilisées et des programmations de dimensionnement. Les méthodes utilisées dans notre étude sont les M.E.V.A (Modélisation, Expérimentation, Validation, Application), tandis que celles de M. Merizak reposent sur des modélisations, sans expérimentation, ni validation, ni application. Dans la démarche suivie, M. Merizak (Merizak, 2020) n'a pas développé de nouveaux modèles. Les

formules empiriques et analytiques utilisées dans notre étude sont des modèles de fonctions exponentielles, tandis que les formules semi-empiriques de M. Merizak sont les équations du National Research Council (NRC) des États-Unis, la formule de Schulze, celle de Bruce-Merkens et celle d'Eckenfelder. Les programmations du dimensionnement dans notre étude sont essentiellement consacrées au logiciel Python, tandis que celles de M. Merizak sont basées sur Microsoft Visual Studio avec le langage BASIC (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code). Concernant la description du logiciel, M. Merizak offre la possibilité de faire appel à quatre méthodes de dimensionnement : NRC à un seul étage, NRC à deux étages, Schulze et Bruce-Merkens, tandis que notre étude couvre les quatre procédés : Rhizopur, Azoé, lits bactériens précédés par des étangs anaérobies et lits bactériens classiques.

Les résultats d'expérimentations dans le tableau 5 montrent de bons rendements, sauf le cas des Nitrites et Nitrates dans le filtre planté. Mais, les valeurs des Nitrites et Nitrates sont inférieures à la norme de rejet malgache (Ministère de l'Environnement des Eaux et Forêts et du Tourisme, 2003) et la norme internationale (Dehbi, 2015). Les valeurs des paramètres de pollution du filtre planté sont presque supérieures à la norme de rejet malgache (Ministère de l'Environnement des Eaux et Forêts et du Tourisme, 2003) et la norme internationale (Dehbi, 2015), sauf les Matières En Suspensions, qui ont été préalablement tamisées. Pour résoudre ce problème, nous proposons d'installer une unité de lit bactérien en amont du filtre planté. Les rendements seront ajustés en fonction des résultats d'études expérimentales.

Les résultats de validation et d'application dans les tableaux 6, 7 et 8 nous montrent de bons résultats, sauf pour le cas des DBO<sub>5</sub> et des surfaces/EH de filtre planté. Selon l'ouvrage de S. Prost-Boucle & P. Molle (Prost-Boucle et Molle, 2013), le volume/EH du lit bactérien varie de 0.04 à 0.15m<sup>3</sup>/EH et la surface/EH de Filtres Plantés Roseaux varie de 0.3 à 0.7m<sup>2</sup>/EH. Selon l'ouvrage de Sylvain Lemang (Lemang, 2001), la surface/EH du lit bactérien traditionnel est de 0.016 m<sup>2</sup>/EH. Nous proposons d'améliorer le rendement en remplaçant le garnissage traditionnel par du plastique.

## 5- Conclusion

Pour conclure, l'objet principal de notre étude est le développement d'un logiciel de dimensionnement des stations d'épuration des eaux usées par traitements biologiques. A partir des valeurs de nombre d'habitants, taux de raccordement, de rejet et dilution, consommation spécifique en eau, ratio de charges polluantes, vitesse de passage à travers la grille, coefficient de colmatage, épaisseur et espacement des barreaux, rendement d'élimination de DBO<sub>5</sub>, constante de biodégradabilité, températures des eaux usées, surface spécifique, hauteur de garnissage, charge massique des lits, hauteurs des massifs filtrants, etc., il permettra d'obtenir les valeurs des consommations en eaux journalières, productions des eaux usées, débits

d'eaux usées, concentrations des charges polluantes, dimensionnement des ouvrages tels que : prétraitements (*dégrilleurs, dessableurs, dégraisseurs*), traitement primaire (*étangs anaérobies, décanteur primaire, décanteur-digesteur*), traitement secondaire (*lit bactérien, filtres plantés, clarificateur*), etc... Nous avons utilisé les modèles empiriques et analytiques issus des littératures scientifiques. Les formules de base pour les dimensionnements des lits bactériens ont été déduites de ces modèles. Les résultats théoriques obtenus à partir de ces modèles ont ensuite été validés expérimentalement en traitant les eaux usées domestiques du Campus universitaire de Vontovorona. Après validation, le logiciel a été conçu sous Python. Il permet de dimensionner les stations d'épuration pour différents procédés : Rhizopur, Azoé, lit bactérien classique avec pouzzolane, etc. Nous avons constaté qu'il n'y a pas de grande différence entre les valeurs des DCO, de la DBO<sub>5</sub>, du MES obtenues expérimentalement et celles issues de notre logiciel. Nous en déduisons la validation de ce logiciel de dimensionnement d'épurations des eaux usées par traitements biologiques, cas des lits bactériens et filtres plantés. Il contribuera à réduire la durée de l'étude ainsi que celle de la réalisation des projets de station d'épuration des eaux usées et constituera un outil d'aide de prise de décision.

## 6- Remerciements

Nous exprimons notre sincère gratitude à toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de cet article, en particulier aux co-auteurs pour leur engagement et leur collaboration. Nous remercions chaleureusement l'ensemble du personnel du **Laboratoire de Recherche en Matériaux, Procédés et Génie Civil** de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo pour leur aide précieuse dans la mise en œuvre des essais expérimentaux. Nos remerciements vont également au personnel du **Laboratoire Qualité Eau de la JIRAMA**, situé à **Mandroseza, Antananarivo**, pour leur collaboration dans la réalisation des analyses des eaux avant et après traitement. Enfin, nous adressons nos remerciements à l'**International Journal of Engineering, Sciences and Technologies (IJEST)** pour avoir accepté de publier cet article.

## 7- Références bibliographiques

### Référence d'article

- [1] Eckenfelder, W. W. (1961). Trickling filtration design and performance. *In Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 87, 2860.
- [2] Nicolas, J., & Vassel, J.L. (1990). Modélisation des échanges thermiques et de la circulation d'air dans un lit bactérien. *In Revue des sciences de l'eau/Journal of water science*. 3 (3): 303-344. Québec: INRS-Eau.
- [3] Rankin, R. J. (1953). Performance of biofiltration plants by three methods. *In Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 79(336): 1–15.
- [4] Schulze, K.L. (1960). Load and Efficiency of Trickling Filters. *In Journal of the Water Pollution Control Fed.*, 32(3): 245-261.
- [5] Velz, J. (1948). A basic law for the performance of biological beds. *In Sewage Works Journal*, 20(4), 607–617.

### Référence de mémoire et de thèse

- [6] Dehbi, F.Z. (2015). Etude comparative des performances d'un lit bactérien à garnissage en pouzzolane de Beni Saf et d'un lit bactérien à garnissage plastique (Master). Université Abou Bekr Belkaid.
- [7] Elomari, C., & Zarrouk, M. (2020). Transformation d'une station d'épuration type lagunage aéré en lits bactériens ou boues activées : Cas de la station de Tamesna (Mémoire de fin d'études, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II). Université de Lorraine.
- [8] En-Nawaoui, A. (2010). Dimensionnement d'une STEP à Lits bactériens précédés d'étang anaérobies et Gestion des sous-produits. Cas de la ville de Kalaa des Sraghna (Mémoire de Mastère Spécialisé en MISEAD). Université de Maroc.
- [9] Lemang, S. (2001). Guide Technique pour l'assainissement des communes rurales (Rapport de stage, D.E.S.S. Génie des procédés de traitements des eaux). Université des sciences et Technologies de Lille.
- [10] Merizak, M. (2020). Elaboration d'un logiciel de dimensionnement des lits bactériens au Maroc (Mémoire de fin d'étude). Université de Maroc.
- [11] Tchutchoua, S.K. (1990). Contribution à l'étude des performances de la filière lit bactérien bassin de maturation dans la STEP E.I.E.R (Mémoire de fin d'études). Université des Sciences et Technologies de Lille.
- [12] Touafek, A. (2015). Etude expérimentale de l'épuration des effluents par procédés à culture fixe (Mémoire de fin d'études). Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf.

[13] Toure, C.S. (1986). Elimination de la pollution carbonée dans deux réacteurs à biomasse fixée sur support de latérite et quartz en conditions climatiques tropicales et sahéliennes (Thèse de doctorant). Université de Lausanne.

### **Ouvrage d'auteur(s)**

- [14] Bernet, N. (2012). Lit bactérien. In *Traitement biologique des eaux usées* (pp. 41–45). Narbonne, France : INRA - Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement.
- [15] Drapeau, A. J., & Jankovic, S. (1977). Manuel de microbiologie de l'environnement (pp. 158–172). Genève, Suisse : Organisation mondiale de la Santé (OMS).
- [16] Fuchs, P., & Poulain, P. (2024). Cours de Python –Introduction à la programmation Python pour la biologie (385p). Paris-France : Université Paris Diderot-Paris 7.
- [17] German ATV Rules & Standards. (2001). Dimensioning of Trickling filters and Rotating Biological Contactors. ATV-DVWK-A-281.
- [18] Marvie, R. (2012). Initiation à Python par l'exemple documentation (108p). Python version 1.5.
- [19] Monbet, V. (2017). Programmer en Python (Notes de cours-Licence 2 en mathématiques, 50p). Université de Rennes 1.
- [20] Prost-Boucle, S., & Molle, P. (2013). Rapport final, office national de l'eau et des milieux aquatiques. Synthèse sur le procédé Azoé (Rapport de 44pages). Lyon, France : EPNAC, Onema-Irstea.
- [21] Racault, Y., & Séguret, F. (2004). Éléments de conception et de dimensionnement des lits bactériens (Document de stage CNFPT, 18 p.). Toulouse, France : Cemagref Bordeaux, UR Qualité des Eaux.
- [22] Roesler, J. F., & Smith, R. (1969). A mathematical model for a trickling filter (Treatment Optimization Research Program).
- [23] Swinnen, G. (1987). Apprendre à programmer avec Python 3 (467p). Paris : Edition Eyrolles.
- [24] Vandevenne, L. (1984). Problèmes liés à la modélisation et au dimensionnement de l'épuration par lit bactérien aérobie. *37th International Congress Cebedeau*, 21–49.
- [25] Virloget, F. (2002). Les lits bactériens. In *Traitement des eaux usées urbaines* (pp. 219–236). Lyon, France : Lyonnaise des eaux, Cirsee-Enges.
- [26] Yasmine, G. Epuration des eaux usées (Polycopié de cours, 68p). Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.

### **Ouvrages d'instituts**

- [27] DINEPA. (2012). Procédés de traitement des eaux usées adaptés aux petites communautés moins de 5000 personnes raccordées au réseau public d'assainissement (Fascicule Technique, Code 2.3.1 FAT1, pp.69-75). Haïti : République de Haïti.

[28] IRCHA. (1982). Etude sur la mise en œuvre des nouveaux garnissages pour les lits bactériens en traitement traditionnel des eaux usées domestiques (Document n°8925/L27/pub-LA/fc-A.9124, 45p). France: Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse.

[29] Ministère de l'Environnement des Eaux et Forêts et du Tourisme. (2003). Normes Malgaches de rejets d'effluents. *In Article 5 du Décret n°2003/464 du 15/04/03 portant sur la classification des eaux de surface et réglementation des rejets d'effluents liquides.*

## 8- Tableaux

**Tableau 1: Notation ou nomenclature**

| Notations                 | Désignations                                                                  | Unités             |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Lettres Latines</b>    |                                                                               |                    |
| $A$                       | : Surface totale du lit bactérien                                             | $m^2$              |
| $H$                       | : Hauteur du lit bactérien                                                    | $m$                |
| $K$                       | : Coefficient de traitabilité qui dépend de la nature des eaux traitées       | $k_T \times A_s/j$ |
| $Q$                       | : Débit apparent de l'affluent                                                | $m^3/j$            |
| $T$                       | : Température des Eaux usées                                                  | $^{\circ}C$        |
| $A_s$                     | : Surface spécifique mouillée du garnissage                                   | $m^2/m^3$          |
| $S_o$                     | : Concentration de substrat initial à l'entrée du lit bactérien               | $mg/l$             |
| $S_t$                     | : Concentration en substrat final ( $DBO_{5t}$ ) à la sortie du lit bactérien | $mg/l$             |
| $c_{hs}$                  | : Charge hydraulique superficielle                                            | $m/j$              |
| $k_{20}$                  | : Coefficient cinétique d'épuration à $20^{\circ}C$                           | $[-]$              |
| $k_T$                     | : Coefficient cinétique corrigée                                              | $m/j$              |
| $p$                       | : Rapport de $\frac{S_t}{S_o}$                                                | $[-]$              |
| <b>Lettres grecques</b>   |                                                                               |                    |
| $\alpha$                  | : Valeur d'exposant sur la hauteur                                            | $[-]$              |
| $\theta$                  | : Facteur ou coefficient de correction de température                         | $[-]$              |
| <b>Exposants utilisés</b> |                                                                               |                    |
| $b$                       | : Exposant sur la surface spécifique                                          | $[-]$              |
| $n$                       | : Coefficient de remplissage                                                  | $[-]$              |

**Tableau 2 : Types des modèles avec formules des modélisations**

| Types des modèles                              | Formules des modélisations                                                 |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Modèle de Schulze (Schulze,1960)               | $\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{-k_T \times H}{\sqrt{\frac{Q}{A}}}} \quad (1)$ |
| Modèle de Vandevenne et al. (Vandevenne, 1984) | $\frac{S_t}{S_o} = e^{\frac{k_T \times A_s \times H}{c_{hs}}} \quad (2)$   |

|                                                                  |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Modèle de DINEPA (DINEPA, 2012) et Nicolas Bernet (Bernet, 2012) | $\frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times A_s \times \frac{H}{C_{hs}^n}} \quad (3)$          |
| Modèle de C.S. Toure (Toure, 1986)                               | $\frac{S_t}{S_o} = \frac{1}{e^{k_T \times A_s \times \frac{H}{C_{hs}^n}}} \quad (4)$ |
| Modèle de Velz (Velz, 1948)                                      | $\frac{S_t}{S_o} = e^{-k_T \times A_s \times \frac{H^\infty}{C_{hs}^n}} \quad (5)$   |

**Tableau 3 : Valeurs théoriques et expérimentale de dimensionnement du lit bactérien**

| Désignation                                                    | Valeurs théoriques | Valeurs expérimentales | Unités                         |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|
| <b>1. Données de base</b>                                      |                    |                        |                                |
| Température des eaux usées                                     | 13                 | 19                     | °C                             |
| Surface spécifique                                             | 125                | 125                    | m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> |
| Concentration en BDO <sub>5</sub> à l'entrée du lit bactérien  | 618,812            | 34,56                  | mg/l                           |
| Exposant sur la surface spécifique                             | 1                  | 1                      | [-]                            |
| Hauteur de garnissage                                          | 0,32               | 0,30                   | m                              |
| Débit moyen journalier en temps sec                            | 0,0283             | 0,0153                 | m <sup>3</sup> /j              |
| Taux de vide                                                   | 0,9                | 0,5                    | [-]                            |
| Nombre de bras du sprinkler                                    | 1                  | 2                      | u                              |
| <b>2. Dimensionnement du lit bactérien</b>                     |                    |                        |                                |
| Concentration en DBO <sub>5</sub> à la sortie du lit bactérien | 129,95             | 5,76                   | mg/l                           |
| Coefficient de remplissage                                     | 0,738              | 0,738                  | [-]                            |
| Charge hydraulique superficielle                               | 0,344              | 0,187                  | m/j                            |
| Surface du lit bactérien                                       | 0,082              | 0,081                  | m <sup>2</sup>                 |
| Diamètre du lit bactérien                                      | 0,32               | 0,32                   | m                              |
| Volume du lit bactérien                                        | 0,026              | 0,025                  | m <sup>3</sup>                 |
| Rendement d'épuration normalisé                                | 0,79               | 0,83                   | [-]                            |

**Tableau 4 : Valeurs théoriques et expérimentale de dimensionnement du filtre planté**

| Désignation               | Valeurs théoriques | Valeurs expérimentales | Unités |
|---------------------------|--------------------|------------------------|--------|
| <b>1. Données de base</b> |                    |                        |        |

|                                            |       |       |                              |
|--------------------------------------------|-------|-------|------------------------------|
| Nombre d'habitants                         | 1     | 0,333 | <i>hab</i>                   |
| Charges polluantes totales de MES          | 0,035 | 0,012 | <i>kg/j</i>                  |
| Charge massique de MES                     | 0,150 | 0,050 | <i>kgMES/m<sup>3</sup>/j</i> |
| Hauteur de revanche                        | 5     | 3,4   | <i>cm</i>                    |
| Hauteur de massifs filtrants               | 50    | 34,11 | <i>cm</i>                    |
| Nombre de plant par m <sup>2</sup>         | 6     | 6     | <i>plants/m<sup>2</sup></i>  |
| <b>2. Dimensionnement du filtre planté</b> |       |       |                              |
| Surface                                    | 0,233 | 0,08  | <i>m<sup>2</sup></i>         |
| Surface spécifique                         | 0,233 | 0,08  | <i>m<sup>2</sup>/EH</i>      |
| Hauteur                                    | 55    | 37,51 | <i>cm</i>                    |
| Volume du lit bactérien                    | 0,13  | 0,03  | <i>m<sup>3</sup></i>         |
| Nombre de plants                           | 6     | 0,5   | <i>plants</i>                |
| Rendement d'épuration normalisé            | 0,80  | 0,93  | <i>[-]</i>                   |

**Tableau 5: Résultats d'analyses des eaux usées avant et après traitement**

| Paramètres                          | Eaux usées brutes | Eaux usées après traitements | Abattements des paramètres | Norme de rejet malgache |
|-------------------------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| <b>TRAITEMENT PAR LIT BACTERIEN</b> |                   |                              |                            |                         |
| Turbidité (NTU)                     | 31,800            | 4,920                        | 84,53%                     | ≤ 25                    |
| Matières En Suspension (mg/l)       | 36,000            | 9,000                        | 75,00%                     | ≤ 60                    |
| Nitrite (mg/l)                      | 0,338             | 0,023                        | 93,20%                     | ≤ 0.2                   |
| Nitrate (mg/l)                      | 2,422             | 0,113                        | 95,36%                     | ≤ 20                    |
| DCO (mg/l)                          | 86,400            | 14,400                       | 83,33%                     | ≤160                    |
| DBO <sub>5</sub> (mg/l)             | 34,560            | 5,760                        | 83,33%                     | ≤50                     |
| <b>FILTRE PLANTE</b>                |                   |                              |                            |                         |
| Turbidité (NTU)                     | 259,000           | 48,900                       | 81,12%                     | ≤ 25                    |
| Matières En Suspension (mg/l)       | 11.770            | 0,800                        | 93,20%                     | ≤ 60                    |
| Nitrite (mg/l)                      | 1,000             | 0,060                        | 39,80%                     | ≤ 0.2                   |
| Nitrate (mg/l)                      | 0,911             | 0,747                        | 18,00%                     | ≤ 20                    |
| DCO (mg/l)                          | 4876,500          | 785,280                      | 83,89%                     | ≤160                    |
| DBO <sub>5</sub> (mg/l)             | 1950,600          | 314,112                      | 83,90%                     | ≤50                     |

**Tableau 6: Résultats des eaux traitées par le procédé de Lit bactérien**

| Paramètres              | Eaux brutes | Valeurs expérimentales à la sortie du lit bactérien | Valeurs théoriques du STEPLIBA à la sortie du lit | Norme de rejet Malgache |
|-------------------------|-------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------|
| DCO (mg/l)              | 86,400      | 14,400                                              | 14,403                                            | ≤160                    |
| DBO <sub>5</sub> (mg/l) | 34,560      | 5,760                                               | 5,761                                             | ≤ 50                    |
| MES (mg/l)              | 36,000      | 9,000                                               | 9,000                                             | ≤ 60                    |

**Tableau 7: Résultats des eaux traitées par le procédé de filtre planté**

| Paramètres              | Eaux brutes | Valeurs expérimentales à la sortie de filtre planté | Valeurs théoriques du STEPLIBA à la sortie de filtre | Norme de rejet Malgache |
|-------------------------|-------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|
| DCO (mg/l)              | 4876,500    | 785,280                                             | 785,604                                              | ≤160                    |
| DBO <sub>5</sub> (mg/l) | 1950,600    | 314,112                                             | 314,047                                              | ≤ 50                    |
| MES (mg/l)              | 11,770      | 0,800                                               | 0,8004                                               | ≤ 60                    |

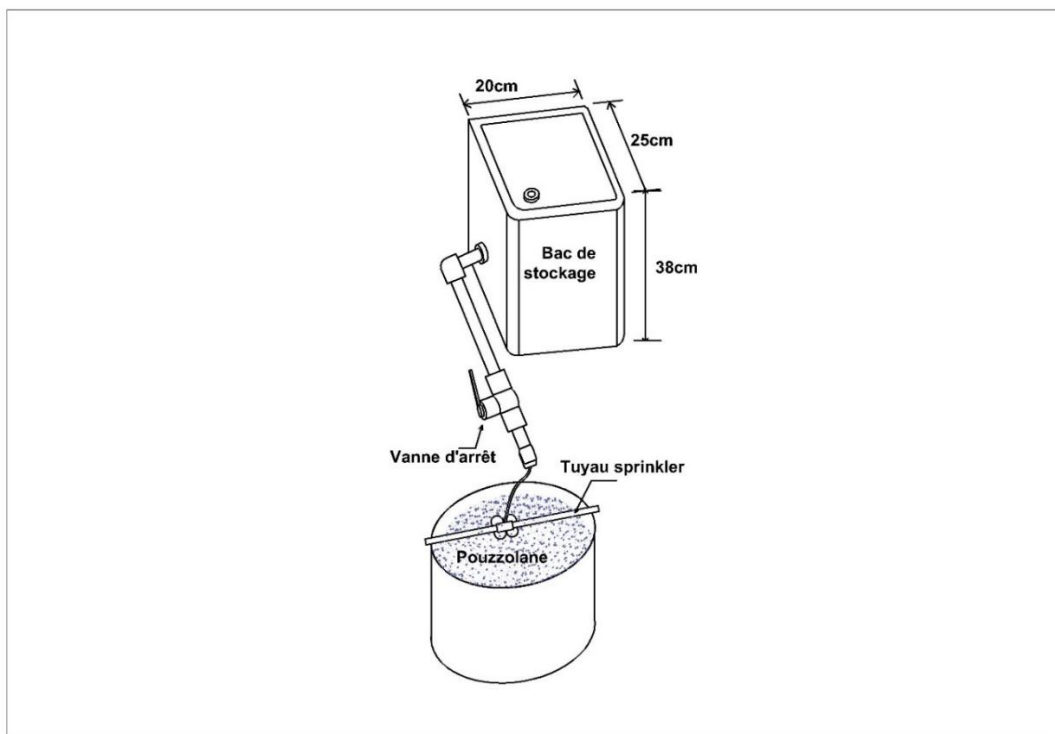
**Tableau 8: Exemple de dimensionnement avec le logiciel STEPLIBA**

| Fonctionnalités à utiliser                  | Données d'entrée                            |          | Données de sortie                                             |         |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------|---------|
|                                             | Paramètres                                  | Valeurs  | Paramètres                                                    | Valeurs |
| Consommation en eaux                        | Nombre d'habitants (hab)                    | 2900     | Consommation en eaux totales journalières (m <sup>3</sup> /j) | 205,94  |
|                                             | Taux de raccordements (%)                   | 100      |                                                               |         |
|                                             | Consommations spécifique (l/hab/j)          | 70       |                                                               |         |
| Production des eaux usées                   | Taux de rejet (%)                           | 80       | Production des eaux usées (m <sup>3</sup> /j)                 | 164,70  |
| Débit d'eaux usées                          | Taux de dilution (%)                        | 15       | Débit moyen journalier (m <sup>3</sup> /j)                    | 189,41  |
|                                             | Coefficient de pointe [-]                   | 1,3      | Débit de pointe horaire (m <sup>3</sup> /h)                   | 21,62   |
| Charges polluantes (concentrations x débit) | Concentration en DCO des eaux brutes (mg/l) | 4876,500 | Charges polluantes DCO des eaux brutes (kg/j)                 | 923,660 |

|               |                                                          |          |                                                             |         |
|---------------|----------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------|---------|
|               | Concentration en DBO <sub>5</sub> des eaux brutes (mg/l) | 1950,600 | Charges polluantes DBO <sub>5</sub> des eaux brutes (kg/j)  | 369,460 |
|               | Concentration en MES des eaux brutes (mg/l)              | 2000,000 | Charges polluantes MES des eaux brutes (kg/j)               | 378,820 |
| Dégrilleur    | Vitesse de passage (m/s)                                 | 0,6      | Coefficient de la section                                   | 0,38    |
|               | Coefficient de colmatage [-]                             | 0,20     | Surface de grille (m <sup>2</sup> )                         | 0,13    |
|               | Epaisseur des barreaux (cm)                              | 1        | Longueur mouille(m)                                         | 0,81    |
|               | Espacement des barreaux (cm)                             | 0,6      | Largeur de grille (m)                                       | 0,17    |
|               | Coefficient de la forme [-]                              | 2,42     | Nombre de barreaux[-]                                       | 11      |
|               | Tirant d'eau (m)                                         | 0,7      | Pertes des charges (m)                                      | 0,076   |
|               | Angle d'inclinaison (°C)                                 | 60       | Quantite de refus (m <sup>3</sup> /j)                       | 0,08    |
| Lit bactérien | Coefficient cinétique (m/j)                              | 0,021    | Concentration en DBO <sub>5</sub> à la sortie du lit (mg/l) | 325,17  |
|               | Surface spécifique (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )     | 105      | Charge hydraulique superficielle (m/j)                      | 3,84    |
|               | Rendement d'épuration[-]                                 | 0,8333   | Surface (m <sup>2</sup> )                                   | 49,36   |
|               | Taux de recirculation [-]                                | 1        | Volume (m <sup>3</sup> )                                    | 197,44  |
|               | Hauteur de garnissage (m)                                | 4        | Temps de séjour (j)                                         | 0,52    |
|               | Exposant de hauteur [-]                                  | 1        | Surface spécifiques (m <sup>2</sup> /EH)                    | 0,016   |
|               | Taux de vide [-]                                         | 0,5      | Volume par habitants (m <sup>3</sup> /EH)                   | 0,064   |
|               | Nombre d'Equivalente d'Habitants (hab)                   | 3100     | MES à l'entre des filtres plantés (mg/l)                    | 500,00  |

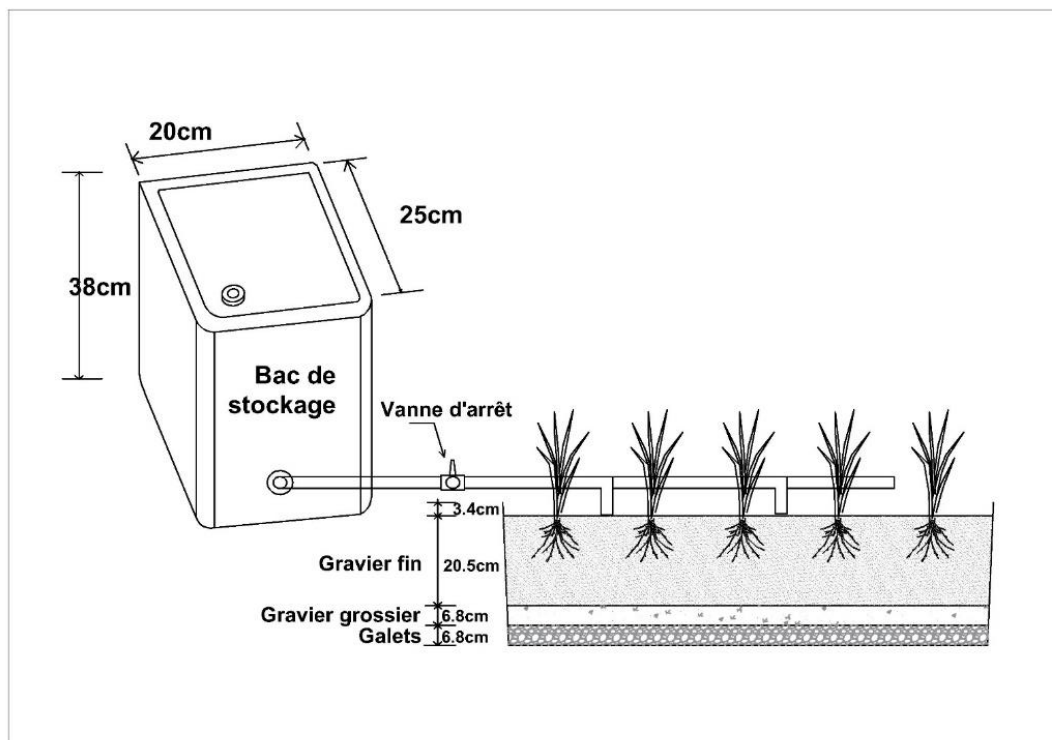
|                 |                                                          |       |                                               |          |
|-----------------|----------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------|----------|
| Filtres plantés | Charges massiques des lits<br>(kgMEST/m <sup>2</sup> /j) | 0,15  | MES à la sortie des<br>filtres plantés (mg/l) | 34,00    |
|                 | Hauteur de revanche (cm)                                 | 20    | Surface des filtres<br>(m <sup>2</sup> )      | 3333,33  |
|                 | Hauteurs des filtrants (cm)                              | 80    | Surface spécifiques<br>(m <sup>2</sup> /EH)   | 1,080    |
|                 | Rendements de MES au lit<br>bactérien [-]                | 0,75  | Volumes des lits (m <sup>3</sup> )            | 3333,333 |
|                 | Rendements de MES des<br>filtres plantés [-]             | 0,932 | Volume par habitants<br>(m <sup>3</sup> /EH)  | 1,080    |

## 9- Figures



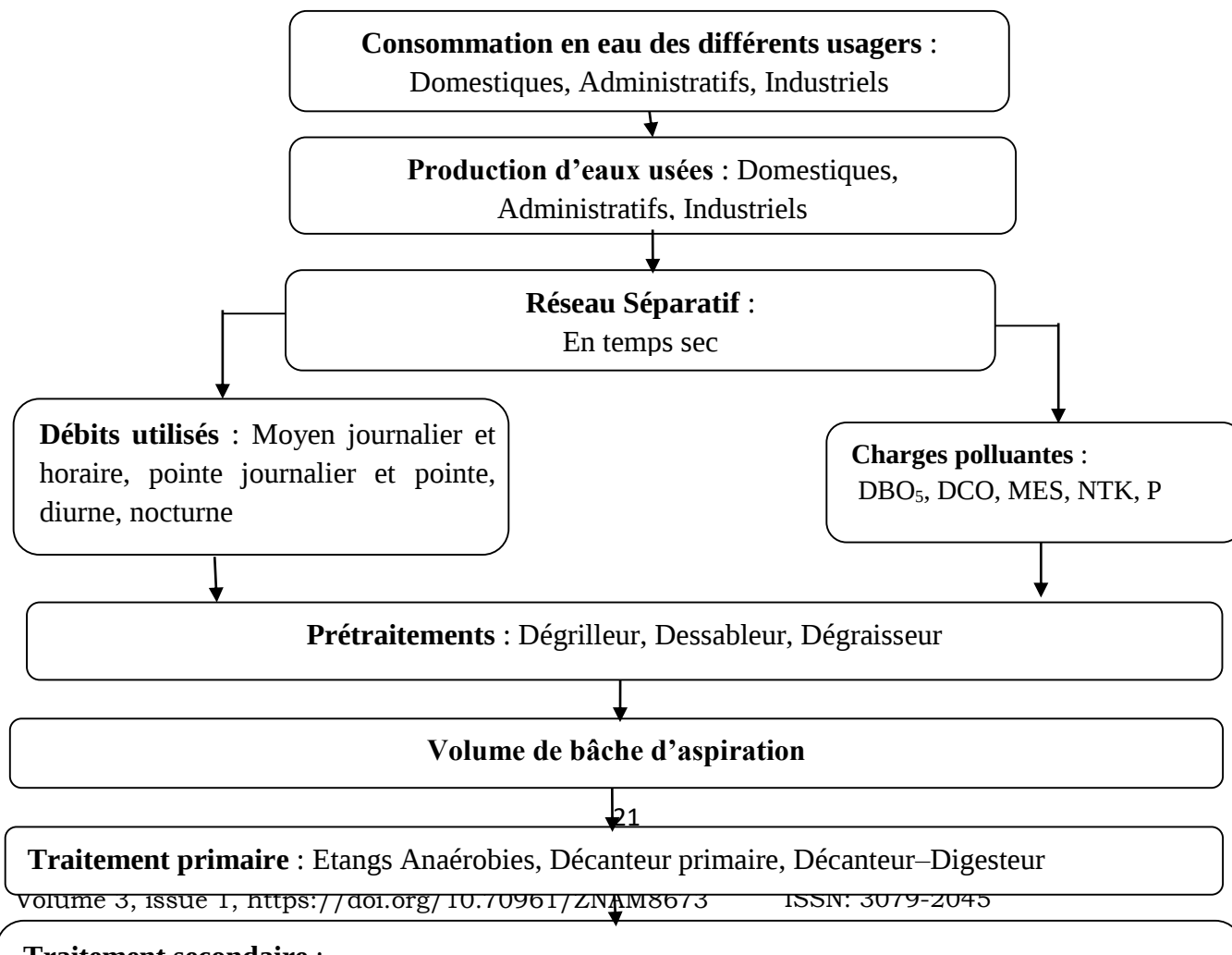
**Figure 1: Système de lit bactérien**

(Source: Auteur )



**Figure 2 : Système de filtre planté**

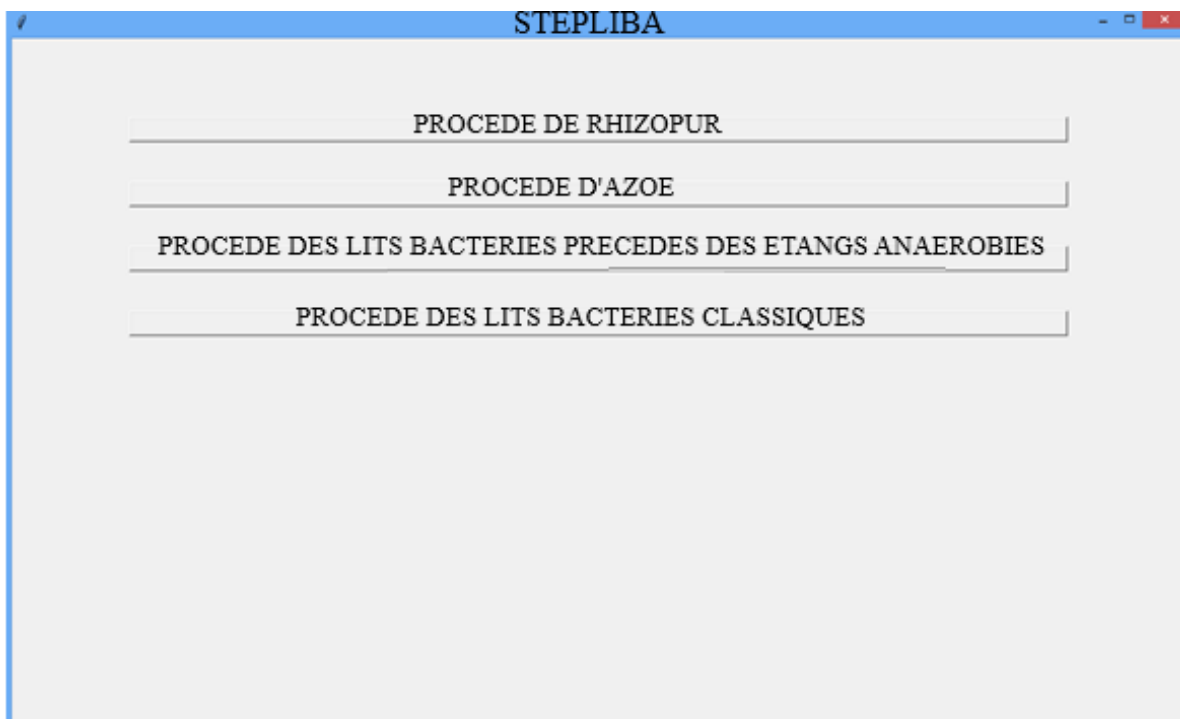
(Source: Auteur )





**Figure 3 : Organigramme des procédés utilisés**

(Source: Auteur )



**Figure 4: Fenêtre d'accueil et la barre de navigation**  
(Source: *Auteur* )