



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



N° d'ordre : M2 /GPE/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des Procédés

Option: Génie des Procédés de l'Environnement

Thème

Contribution au traitement des eaux usées par biofiltration

➤ Présenté par : NGILA NGILA BOTOSI Yanick

Soutenu le 30/06/ 2020

Devant le jury composé de :

Président :	Melle DELLALI Halima	MAA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	Mme MOHAMED SEGHIR Zahira	MAA	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mme KHELLADI Malika	MAA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

J'adresse mes plus vifs remerciements à **M^{me} M. KHELLADI**, enseignante à la faculté des Sciences et Technologies, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem département de Génies des Procédés, pour l'honneur qu'elle m'a donné pour encadrer ce travail, ses conseils, sa patience.

J'exprime mes sincères remerciements à **M^r A. DEBAB** enseignant à la faculté des Sciences et Technologie (USTO) de m'avoir accepté d'accéder à son laboratoire (LIPE) ainsi que pour ses données scientifiques qui sont un apport pour moi.

Mes remerciements s'adressent à **Melle H. DELLALI** enseignante au département de Génies des Procédés, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, de l'honneur qu'elle m'a donné d'avoir acceptée de présider le jury de mon projet.

Mes remerciements vont à **M^{me} Z. MOHAMED SEGHIR**, enseignante au département de Génies des Procédés, d'avoir acceptée d'examiner ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous les enseignants (es) du département de Génies des Procédés de la faculté des Sciences et Technologies Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

Et par peur d'oublier, je tiens à remercier et saluer toute personne, de près ou de loin, qui m'a aidé quoi qu'avec un mot à arriver à écrire ces mots... Pour ceux qui ont été cités ou non ... Je dis à eux ...*Merci*.

Table des Matières

Résumé	1
Introduction	2
CHAPITRE I. Procédés de traitement des eaux usées et des boues d'épuration	
I.1. L'eau dans le monde	4
I.2. Contexte des eaux	4
I.2.1. Définition des eaux	4
I.2.2. Origines des eaux usées	5
I.3. Les paramètres de pollutions des eaux usées	5
I.3.1. Paramètres physico-chimiques	5
I.3.2. Paramètre biologique	6
I.3.3. Éléments nutritifs	7
I.4. Impacts des eaux	7
I.4.1. Effet sur l'environnement	7
I.4.2. Effet sur la santé de l'homme	7
I.5. Eaux usées traitées et réutilisation en agriculture	7
I.6. Procédés de traitement des eaux usées	8
I.6.1. Le choix d'un procédé d'épuration	8
I.6.1.1. Caractéristiques des eaux usées	8
I.6.1.2. L'exploitation	9
I.6.1.3. Les coûts	9
I.6.1.4. Le site	9
I.7. Les réseaux des collectes	9
I.8. Les étapes de traitement des eaux usées	10
I.8.1. Les prétraitements	11
I.8.1.1. Le dégrillage	11
I.8.1.2. Le dessablage	11
I.8.1.3. Le déshuilage, le dégraissage	12
I.8.2. Le traitement primaire	12
I.8.2.1. La décantation	12
I.8.2.2. La flottation	13
I.8.2.3. La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant-floculant	13
I.8.3. Traitement secondaire	13
I.8.3.1. La clarification (décantation secondaire)	14
I.8.4. Traitement tertiaire	14
I.8.4.1. La déphosphatation	14

I.8.4.2. La désinfection	14
I.8.5. Réutilisation de l'eau dans le domaine agricole (irrigation)	15
I.9. Traitement des boues	15
I.9.1. Les boues primaires	15
I.9.2. Les boues physico-chimiques	16
I.9.3. Les boues biologiques	16
I.9.4. Les boues mixtes	16
I.9.5. Les boues d'aération prolongée	16
I.10. Cadre réglementaire	16

CHAP II. Procédés de traitement biologique des eaux usées

II.1. Généralités sur le traitement biologique des eaux usées	18
II.1.1. Principe de l'épuration biologique aérobie	18
II.1.2. La croissance bactérienne	19
II.1.3. Modélisation de la croissance bactérienne	20
II.2. Les techniques de traitement biologique	20
II.2.1. Traitement par boues activées	21
II.2.2. Traitement par lagunage	21
II.2.3. Traitement par disque biologique	23
II.2.4. Traitement par biofiltre	24
II.2.4.1. Principe de fonctionnement	25
II.2.4.2. Les paramètres de fonctionnement du lit bactérien	26
II.2.4.3. Classification des lits bactériens	27
II.2.4.4. Composition des effluents destinés pour la biofiltration	31
II.2.5. Les avantages et les inconvénients de chaque technique d'épuration	32

CHAP III. Présentation du dispositif expérimental et calcul théorique

III.1. Introduction	34
III.2. Présentation du dispositif expérimental	35
III.2.1. Calcul théorique	37
Conclusion générale	43
Référence bibliographique	44

Liste des figures

Figures I.1. Etapes de traitement des eaux	10
Figure I.2. Dégrilleur fin mécanique	11
Figures I.3. Déssableur-déshuileur	12
Figure I.4. Décanteur	13
Figure I.5. Clarificateur	14
Figure II.1. Croissance d'une culture bactérienne	19
Figure II.2. Symbolique d'une boue activée-aération	21
Figure II.3. Les mécanismes mis en jeu dans un bassin de lagunage naturel	21
Figure II.4. Schéma de principe de système lagunaire	22
Figure II.5. Synoptique d'une STEP à disque biologique	23
Figure II.6. Schéma de principe d'un disque biologique	23
Figure II.7. Lit bactérien	25
Figure II.8. Pouzzolane	29
Figure II.9. Exemple de matériaux de remplissage en vrac	31
Figure II.10. Exemple d'un remplissage ordonné	31
Figure III.1. Dispositif expérimental	35
Figure III.2. Procédé de traitement par lit bactérien avec recyclage	40
Figure III.3. Représentation des variations de log pour chaque débit	42

Liste des tableaux

Tableau I.1 : normes internationales de rejets liquides	16
Tableau I.2 : recommandations de l’OMS	17
Tableau II.1 : classification des lits bactériens	28
Tableau II.2 : les caractéristiques chimiques de la pouzzolane naturelle	29
Tableau II.3 : les caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle	30
Tableau II.4 : type de matériaux plastiques et leurs caractéristiques	31
Tableau II.5 : avantage et inconvénient du procédé à boues activée	32
Tableau II.6 : avantage et inconvénient des lits bactériens	32
Tableau II.7 : avantage et inconvénient du bio-disque	33
Tableau II.8 : avantage et inconvénient du biofiltration	33
Tableau III.1 : résultats expérimentaux d’après 6469	41
Tableau III.2 : calcul du taux de recyclage	41
Tableau III.3 : résultats des calculs	41
Tableau III.4 : constante globale de biodégradabilité en fonction de la charge	42

Liste des abréviations

Ch : Charge hydraulique.

CE : Conductivité Electrique

DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène pendant cinq jours.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

EH : Equivalent Habitant

H : Hauteur

Hab. : Habitant.

MES : Matières En Suspension.

MMS : Matières minérales en suspension.

MVS : matières Volatiles en Suspension.

MO : Matières Organiques.

N-org : Azote organique.

NTK : L'azote kjeldahl..

OMS : Organisation Mondial de la Santé.

ONA : Office National d'Assainissement.

pH : potentiel d'Hydrogène.

PVC : Polychlorure de vinyle

RPAC : Réacteur Parfaitement Agité Continu.

Résumé

Ces travaux relatent la mise au point d'un dispositif du traitement biologique des eaux usées par le biofiltre en détaillant les différents éléments constitutifs de l'équipement et les paramètres de fonctionnalité de ce procédé. Cela consiste à évaluer le rendement épuratoire et ses performances.

Mots Clés : biofilm, microorganisme, eaux usées, biofiltre

Abstract

This work relates to the development of a device for the biological treatment of wastewater by the biofilter, detailing the different components of the equipment and the functional parameters of this process. This consists in evaluating the purifying performance and others performances.

Introduction

Capter l'eau directement à partir de sources non traditionnelles telles que les eaux usées industrielles ou municipales et leur redonner une suffisante qualité pour être réutilisées ou libérées directement dans les eaux de surfaces à un coût abordable est un défi. Les eaux usées contiennent une grande variété de contaminants et d'agents pathogènes, et ont une charge très élevée de matière organique, qui doit être retirée ou transformée en composants inoffensifs.

Les procédés classiquement utilisés pour l'épuration des eaux usées peuvent enlever certaines matières organiques mais ne sont pas aussi efficaces pour éliminer les micropolluants qui représentent un problème important en raison de leurs effets négatifs sur la santé et l'environnement.

Beaucoup de micropolluants organiques présents dans les eaux usées municipales, comme les produits pharmaceutiques, les produits de soins corporels, les détergents, les biocides et les pesticides sont mal éliminés dans les stations d'épuration conventionnelles (STEP). Pour réduire l'apport de ces substances dans les eaux de surface, des traitements complémentaires par biofiltration sont nécessaires.

La lutte contre la pollution des eaux devient la préoccupation des pays du monde entier, ce qui les oblige à développer des techniques pour dépolluer l'eau usée dont le but sera la réutilisation saine des grandes quantités jetées dans la nature.

Les procédés biologiques de traitement des eaux usées les plus utilisés sont les boues activées et les lits bactériens (biofiltres). Cependant, les techniques de traitement par boues activées nécessitent un investissement important, une technicité élevée et une consommation énergétique importante au niveau du bassin biologique, ce qui impose à développer d'autres procédés alternatifs comme les biofiltres qui sont moins énergivores, faciles à construire et dont la gestion est simple avec un rendement épuratoire élevé.

L'objectif de ce travail fixé au départ était de concevoir un pilote de traitement des eaux usées constitué de deux colonnes ou biofiltres remplies de garnissage comme support et d'étudier ses performances épuratoires. Ce travail a été initié au laboratoire, le montage presque terminé mais malheureusement tout a été interrompu suite à la conjoncture actuelle.

Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre expose les généralités sur le traitement des eaux usées et des boues d'épuration.
- Le deuxième chapitre traite les techniques d'épuration biologiques.

- Le troisième chapitre est consacré à la présentation du dispositif expérimental et les calculs théoriques.

Au terme de ce travail, une conclusion générale est donnée.

I.1 L'eau dans le monde

L'eau constitue 70 % de la surface de la terre, ce qui correspond à 1,4 milliards de km³. Elle est présente sous forme salée et douce.

L'eau salée représente 97,2 % de la quantité globale tandis que l'eau douce n'en représente que 2,8 %.

Les eaux douces sont réparties en :

- 2,15% de glace polaire.
- 0,63% d'eau souterraine.
- 0,02% d'eau de surface.
- 0,001% d'eau atmosphérique.

La majorité des eaux douces sont inutilisables, ce qui correspond au ¼ de celles disponibles pour que tous les habitants de la planète qui ont accès à cette source vitale.

L'utilisation des prélèvements mondiaux de l'eau douce selon les secteurs se répartie comme suit

- Agriculture 70%.
- Industrie 20%.
- Consommation domestique 10%.

La répartition inégale de l'eau douce sur la planète a conduit à 1,1 milliards de personnes n'ayant pas accès à l'eau salubre à cause de la pollution des ressources d'eaux. 1/3 de la population mondiale est privée d'eau [1].

L'indisponibilité, la difficulté de renouvellement des ressources à cause du changement climatique, l'inégalité de répartition et surtout la contamination des eaux par les différents types de pollution, imposent aux pays du monde de trouver et développer des techniques qui visent l'amélioration de la qualité de l'eau potable et réutiliser la quantité journalière énorme des eaux usées rejetées dans l'environnement.

I.2 Contexte des eaux usées

I.2.1 Définition des eaux usées

Les eaux usées sont définies comme étant des eaux ayant subies une dégradation à la suite d'activités (domestiques, industrielle, agricoles, etc.) [2].

Chapitre I : Procédés de traitement des eaux usées et des boues d'épuration

Toute pollution de l'eau est une altération dans un sens défavorable, d'une ou plusieurs caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques de cette eau provoquée par le rejet de produits liquides, solides ou gazeux [3].

I.2.2 Origines des eaux usées

Selon l'origine des substances polluantes, on distingue quatre catégories des eaux usées :

- **Les eaux usées domestiques** : elles sont essentiellement polluées par les matières organiques et les détergents. Elles se répartissent en :
 - Eaux ménagères (eaux de cuisines ou salles de bains), qui sont chargées en matière grasse.
 - Eaux de vannes, constituées d'eaux de toilettes chargées en matières azotées et de germes fécaux.

Les statistiques ont montré que la pollution journalière produite par une personne utilisant de 150 à 200 litres d'eau est évaluée à :

- 70 à 90 g de MES,
 - 60 à 70 g de MO,
 - 15 à 17 g de matières azotées,
 - 4 g de phosphore,
 - plusieurs milliards de germes pour 100 ml [2].
- **Les eaux industrielles et artisanales** : leurs caractéristiques sont fonction de l'industrie qui génère ces eaux. Elles peuvent contenir des matières organiques, phosphorées, azotées, des solvants, des métaux lourds, des hydrocarbures, etc.
 - **Les eaux agricoles** : elles résultent de l'élevage et de la culture.
 - **Les eaux pluviales** : elles peuvent être une source de pollution des cours d'eau par le fait qu'elles les contaminent d'impuretés puisées de l'air ou des sols lors du ruissellement [4].

I.3 Les paramètres de pollution des eaux usées

Ils se répartissent en paramètres physico-chimiques, biologiques et nutriments.

I.3.1 Paramètres physico-chimiques

Ces paramètres concernent les variables physiques et chimiques des eaux usées. Parmi elles on cite :

- **Le potentiel d'hydrogène (pH)** qui représente le degré d'acidité ou de l'alcalinité du milieu.
- **La température (T)** qui a un impact sur la solubilité des sels et des gaz.
- **Conductivité électrique (CE)** qui mesure et évalue la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution [5].
- **Les matières en suspension (MES)**: elles correspondent à la pollution insoluble particulaire, ou la totalité des particules charriées par les eaux brutes [6]. Elles sont constituées par les matières minérales et les matières volatiles en suspension. La détermination des MES se fait par filtration ou centrifugation [7].

Les MES s'expriment par la relation suivante :

$$\text{MES} = 30\% \text{ MMS} + 70\% \text{ MVS}$$

1. **les matières minérales (MM)** : représentent les résidus secs lors de l'évaporation totale de l'eau. Elles sont constituées par les matières minérales en suspension et les matières solubles (phosphate, chlorures, etc.).
 2. **les matières volatiles sèches (MVS)** : représentent la fraction organique des MES, et sont obtenues par calcination des MES à 525°C pendant deux heures. La différence de poids entre MES à 105°C et MES à 525°C donne la « perte au feu » et correspond à la teneur en MVS d'une eau.
- **Demande chimique en oxygène (DCO)** : elle représente la consommation en oxygène lors d'une réaction d'oxydation des matières oxydables par un oxydant puissant en présence de catalyseur [5].
 - **Demande biologique en oxygène (DBO₅)** : c'est la consommation d'oxygène en cinq jours par des micro-organismes existant dans les eaux.
 - **Les matières oxydables** : c'est un paramètre utilisé pour caractériser la pollution organique de l'eau. Il est donné par la formule suivante :

$$MO = (DCO + 2 * DBO_5) / 3$$

- **La turbidité** : ce paramètre indique la présence de matière organique ou minérale sous forme colloïdale en suspension. Elle varie suivant les MES présentes dans l'eau.

I.3.2 Paramètres biologiques

Les eaux usées contiennent des micro-organismes (champignons, helminthes, protozoaires, bactéries, virus, etc.) dont certains sont pathogènes.

Chapitre I : Procédés de traitement des eaux usées et des boues d'épuration

La présence de coliformes et des Streptocoques témoigne d'une contamination fécale de ces eaux qu'il est impératif d'épurer pour préserver le milieu naturel [8].

I.3.3 Éléments nutritifs

La détermination des teneurs de l'azote et du phosphore total dans les eaux usées épurées, montre le risque que présentent ces deux éléments vis-à-vis du phénomène d'eutrophisation et de la pollution des nappes. Toutefois, ils sont considérés comme des fertilisants en cas de réutilisation en irrigation [9].

Ces deux éléments se présentent sous diverses formes :

- **Azote** : il est présent dans les eaux usées sous forme d'azote organique, d'azote ammoniacal (NH_3 , NH_4^+), de nitrates (NO_3^-) et de nitrites (NO_2^-).

On distingue :

- L'Azote total : qui regroupe toutes les formes citées ci-dessus,
 - L'Azote kjeldahl (NTK) : qui représente l'azote ammoniacal et l'azote organique [5].
- **Phosphore total** : il se trouve sous forme ortho-phosphate (PO_4^+) combiné avec des matières organiques (phospholipides, acides nucléiques, etc.) et minérales (Al, Fe et Ca) [10].

I.4 Impacts des eaux usées

Les eaux usées ont des effets néfastes sur l'environnement et les êtres vivants.

I.4.1 Effet sur l'environnement : avec un taux de recouvrement de réseau national d'assainissement égal à 85%, certaines agglomérations et communes déversent leurs eaux usées directement dans le milieu naturel, les oueds, les barrages ainsi que dans la mer [11].

I.4.2 Effet sur la santé de l'homme : dans les pays en développement 80% des maladies sont de causes hydriques. Selon l'OMS, 1,6 millions d'enfants meurent chaque année de maladies hydriques [12, 13].

En Algérie, souvent, les réseaux d'assainissement et les réseaux d'alimentation en eau potable sont confondus ou adjacents, ce qui, en absence d'entretien, provoquent des fuites qui contaminent les eaux potables.

I.5 Eaux usées traitées et réutilisation en agriculture

L'agriculture est le secteur le plus consommateur de l'eau avec un taux de consommation égal à 65%. La gestion durable des ressources en eau a imposé une nouvelle

politique durant ces dernières décennies, qui consiste à la valorisation de la quantité importante des eaux usées rejetées par le citoyen algérien.

L'épuration de l'eau usée et son utilisation en irrigation est une option attrayante, en particulier dans les zones arides et semi-arides, car elle représente une source d'eau et d'engrais additionnels renouvelables et fiables [13].

I.6 Procédés de traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées a pour but de les dépolluer pour qu'elles n'altèrent pas la qualité des eaux des milieux naturels récepteurs [14].

L'eau épurée est une eau usée traitée jusqu'à un niveau de pollution toléré par la législation (norme internationale, nationale ou OMS) pour être déversée dans un milieu naturel [15].

I.6.1 Le choix d'un procédé d'épuration

Il existe différentes techniques d'épuration. Le choix d'un procédé repose sur les critères suivants :

I.6.1.1 Caractéristiques des eaux usées

a- Une sous charge organique, représentée par la DBO qui en fonction de son rapport de biodégradabilité (DCO/DBO_5), impose un type de traitement. C'est ainsi que :

1. $DCO/DBO_5 = 1 \Rightarrow$ *épuration biologique;*
2. $1 < DCO/DBO_5 < 1,6 \Rightarrow$ *épuration biologique très poussée;*
3. $1,6 < DCO/DBO_5 < 3,2 \Rightarrow$ *épuration biologique associée*
à un traitement biochimique
4. $DCO/DBO_5 > 3,2 \Rightarrow$ *traitement biochimique.*

En plus du rapport de biodégradabilité, l'apport en nutriments doit être envisagé.

Les micro-organismes épurateurs nécessitent des apports en nutriments (azote, phosphore) dans des conditions normales. Les proportions doivent être de :

$$DBO_5/N/P = 100/5/1.$$

Pour un effluent urbain, on a : $DBO_5/NTK/P = 100/20/3,75$ [16].

Chapitre I : Procédés de traitement des eaux usées et des boues d'épuration

En fonction du traitement biologique recherché et des populations bactériennes à favoriser, il convient de respecter les rapports nutritifs suivants :

- $10 < DCO/N < 60 \Rightarrow$ favoriser la dénitrification;
- $30 < DCO/P < 300 \Rightarrow$ favoriser la déphosphatation.

a-Dilution importante (concentration moyenne à 200 mg/l),

b-Variations brutales de charge,

c-Effluents septiques : issus des dispositifs d'assainissements individuels qui auraient dû être abandonnés lors du raccordement à l'égout [17].

I.6.1.2 L'exploitation

Les contraintes relatives à l'exploitation seront particulièrement décisives pour les petites collectivités qui disposent de moyens personnels très limités et qui doivent souvent faire appel à des sociétés de services.

I.6.1.3 Les coûts

L'exploitation des procédés extensifs est légèrement moins coûteuse que celle des procédés intensifs en matière de coût énergétique et celui pour la gestion des boues [17].

I.6.1.4 Le site

Il est caractérisé par :

- La proximité d'un milieu naturel agréable,
- Les caractéristiques géotechniques,
- Le taux d'infiltration des sols,
- La lithologie du sous-sol,
- La topographie du terrain,
- La direction des vents,
- La distance par rapport aux habitations,
- La situation par rapports aux rejets en aval [17].

I.7 Les réseaux de collecte

L'acheminement des eaux usées vers les stations de traitement se fait par des réseaux de collecte. Il en existe deux types :

Chapitre I : Procédés de traitement des eaux usées et des boues d'épuration

-**Les réseaux unitaires** : ce sont des évacuations dans les mêmes canalisations des eaux usées domestiques et des eaux pluviales. Ces réseaux ont l'avantage d'être économiques et simples.

Il est indispensable de prévoir un système de contrôle pour considérer les variations brutales de débit des eaux pluviales.

-**Les réseaux séparatifs** : La collecte des eaux usées et des eaux domestiques se fait dans des réseaux distincts. Ce système permet de :

- Traiter uniquement les eaux domestiques (débit fixe),
- Assurer le bon fonctionnement des stations d'épuration,
- Diminuer le coût de traitement,
- Eviter le risque de débordement des eaux usées dans les milieux naturels [18].

I.8 Les étapes de traitement des eaux usées

Le processus d'épuration des eaux usées est composé de :

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

Le schéma global de traitement des eaux usées est illustré sur la figure ci-dessous.

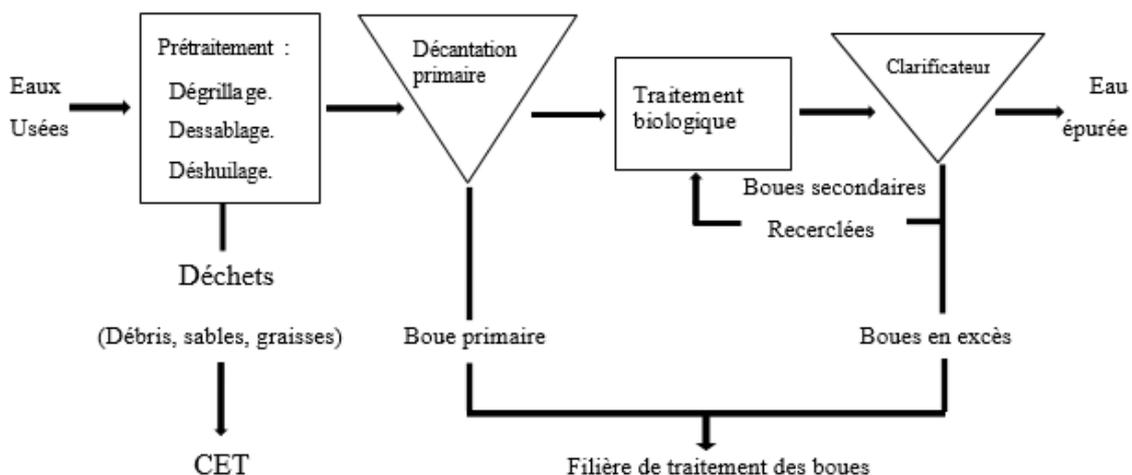


Figure I. 1 : étapes de traitement des eaux usées.

I.8.1 Le prétraitement

Le prétraitement est l'ensemble des opérations adoptées pour l'élimination des déchets grossiers et la masse spécifique (graisses) entraînés par les eaux usées. Cette étape a pour objectif :

- Réduire la taille des ouvrages et les protéger,
- Assurer un traitement efficace des eaux usées,
- Eviter de perturber l'efficacité des étapes ultérieures de traitement comme la décantation et l'aération.

Le prétraitement repose sur deux critères physiques qui sont :

- La granulométrie (dégrillage),
- La densité (dessablage, dégraissage).

I.8.1.1 Le dégrillage

Il permet d'enlever les matières volumineuses charriées par les eaux usées brutes à l'aide d'une succession de grilles inclinées ou perpendiculaires, au nombre de 2 à 4, de plus en plus fines selon la taille des objets à piéger [17].



Figure I. 2 : dégrilleur fin mécanique.

I.8.1.2 Le dessablage

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, les sables et les particules minérales plus ou moins fines. Ceci pour :

- Eviter les dépôts dans les canaux et conduites,
- Protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion,

- Eviter de surcharger les étapes de traitement suivant.

I.8.1.3 Déshuilage, dégraissage

Le déshuilage est une séparation liquide-liquide, tandis que le dégraissage est une séparation solide-liquide à basse température pour permettre le figeage des graisses. Ces dernières flottent à cause de leur densité qui est faible par rapport à celle de l'eau [17].

La flottaison peut être soit naturelle soit forcée par injection d'air.

Les opérations de déshuilage et de dégraissage permettent de :

- Limiter la quantité de graisses susceptibles de se coller, s'agglutiner et de flotter dans les ouvrages,
- Eviter le problème de la fermentation,
- Eviter l'encrassement de la station par des corps gras.

Habituellement, le dessablage et le déshuilage s'opèrent dans le même bassin (figure I.3).



Figure I. 3: dessableur-déshuileur.

I.8.2 Le traitement primaire

Ce traitement est important pour réduire la DCO, DBO_5 et les MES. Son principe est la rétention des particules décantables [16].

Trois voies de traitement sont possibles :

I.8.2.1 La décantation

C'est un processus physique basé sur le principe de séparation solide-liquide par gravitation. C'est ainsi que les MES présentes dans les eaux usées se sédimentent naturellement.



Figure I. 4: décanteur.

I.8.2.2 La flottation

C'est un processus physique de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique réelle ou apparente est inférieure à celle de l'eau.

I.8.2.3 La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant-floculant

Ce processus physico-chimique aide à favoriser l'agglomération de MES et des colloïdes par ajout d'un coagulant et d'un floculant, de façon à augmenter la sédimentation par l'obtention de flocs plus gros [17].

A la fin du traitement primaire, une quantité de charge polluante est éliminée dont la composition est la suivante :

- 90 % de MES,
- 35 % de DBO₅,
- 70 % de DCO [16].

Les boues issues de ce traitement sont "les boues primaires". Ce sont des boues, non stabilisées donc fermentescibles.

I.8.3 Le traitement secondaire

Il est purement biologique et se déroule sur deux phases.

- Une phase de développement des bactéries qui se rassemblent en films ou en flocons.
- Une deuxième phase de décantation des boues qui se forment par action physique et physico-chimique par la rétention et dégradation de la pollution organique soluble au niveau du clarificateur [16,19].

I.8.3.1 La clarification (décantation secondaire)

C'est un processus physique qui sert à séparer les floccs biologiques de l'eau interstitielle. Une fraction des boues décantées sera recirculée en tête des ouvrages de traitement biologique et le reste sera cheminé vers les ouvrages de traitement des boues.



Figure I. 5: clarificateur.

I.8.4 Traitement tertiaire

Les composés restants du traitement secondaire sont généralement éliminés par traitement tertiaire qui consiste en une ozonation, une coagulation / floculation, une filtration par membrane ou par adsorption (charbon actif ou résines échangeuses d'ions). Le rendement est en général très satisfaisant puisque ces procédés permettent d'abattre jusqu'à :

- 75 à 95 % de la DCO,
- 97 % des composés aromatiques,
- 98 % de la couleur.

Le traitement tertiaire dans les stations d'épuration comporte les deux procédés suivants :

I.8.4.1 La déphosphatation

Elle consiste à précipiter le phosphore dans les eaux épurées par l'ajout d'un sel minéral (FeSO_4).

I.8.4.2 La désinfection

Elle a pour but d'éliminer les micro-organismes pathogènes des eaux épurées pour protéger la vie aquatique et, en cas d'utilisation de ces eaux dans l'irrigation, éliminer le risque sanitaires chez l'homme et les animaux de pâturage.

I.8.5 Réutilisation de l'eau dans le domaine agricole (irrigation)

L'eau usée traitée à l'aval des systèmes d'assainissement urbains représente une eau renouvelable non conventionnelle, qui pourrait être une source attrayante et bon marché à employer en agriculture, au voisinage des centres urbains. Cependant, en raison de la nature variable de cette eau (sa charge en constituants minéraux, organiques et biologiques) ; sa réutilisation devrait être gérée soigneusement, surveillée et contrôlée par des spécialistes afin de vérifier les risques et menaces potentiels sur les usagers, le sol, et les cultures irriguées avec elle, ainsi que sur l'environnement dans son ensemble.

a. la réutilisation en irrigation : L'irrigation de cultures ou d'espaces verts est la voie la plus répandue de réutilisation des eaux usées urbaines. Au niveau mondial, c'est également la solution qui a le plus d'avenir à court et à moyen terme. La quantité des eaux usées rejetées incite les agriculteurs à utiliser cette source d'eau. Aussi, la richesse en éléments fertilisants tels que l'azote, le phosphore et le potassium, nécessaires pour le développement des plantes et aussi pour la fertilisation du sol, permet d'économiser l'achat des engrais et d'augmenter la production agricole.

b. Réutilisation en zone urbaine : En zone urbaine et périurbaine, la réutilisation des eaux usées est une source importante. Les usages les plus courants sont l'irrigation d'espaces verts (parcs, golfs, terrains sportifs), l'aménagement paysager (cascades, fontaines, plans d'eau), le lavage des rues ou des véhicules et la protection contre l'incendie. Une autre application importante est le recyclage en immeuble, par exemple l'utilisation de l'eau ménagère traitée pour le lavage.

I.9 Traitement des boues

Le processus de traitement des eaux usées génère une quantité importante de boues constituées de boues primaires et de boues secondaires. Ces dernières subissent différents traitements (déshydratation, séchage, etc.) pour être utilisées comme fertilisants biologiques dans l'agriculture ou énergétique (méthanisation) pour la production du biogaz [20].

I.9.1 Les boues primaires

Ce sont les dépôts récupérés par une simple décantation des eaux usées (dans les décanteurs-digesteurs par exemple). Elles présentent des concentrations élevées en matières minérales (sable, terre...) mais aussi en matière organique pouvant évoluer.

I.9.2 Les boues physico-chimiques

Elles ressemblent aux boues primaires sauf que durant le traitement de l'eau usée, il a été rajouté un réactif (sels de fer, d'aluminium, et autres agents flocculants) pour agglomérer les fines particules et améliorer la décantation.

I.9.3 Les boues biologiques

Elles sont aussi appelées boues secondaires, elles proviennent d'une épuration biologique des eaux (boues activées, disques biologiques, lits bactériens...). Ces boues, de concentrations médiocres (10 g/l), sont très organiques car elles sont principalement constituées de corps bactériens et de leurs sécrétions.

On distingue aussi :

I.9.4 Les boues mixtes

Constituées d'un mélange de boues primaires et biologiques, elles proviennent de la plupart des stations de traitement complètes.

I.9.5 Les boues d'aération prolongée

Obtenues sans décantation primaire avec des matières polluantes intensivement aérées. Les boues sont peu concentrées, moins organiques et donc moins susceptibles de produire des nuisances. On les appelle « bio-solides » quand les boues sont traitées.

I.10 Cadre réglementaire

- Normes internationales

Les valeurs limites définies par l'OMS pour une eau usée traitée sont regroupées dans le tableau I.1 et celles destinées à l'irrigation sont regroupées dans le tableau I.2.

Tableau I.1: Normes internationales de rejets liquides.

<i>paramètres</i>	<i>unité</i>	<i>Normes OMS</i>
DBO₅	mg/l	< 30
DCO	mg/l	< 90
MES	mg/l	< 20
NH₄⁺	mg/l	< 0,5
NO₂⁻	mg/l	1
NO₃⁻	mg/l	<1
P₂O₃	mg/l	< 2
pH	-	6,5 – 8,5
température	°C	< 30

Chapitre I : Procédés de traitement des eaux usées et des boues d'épuration

Tableau I.2: Recommandations de l'OMS.

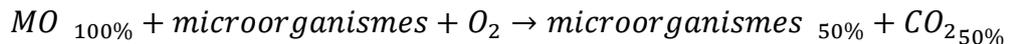
<i>catégories</i>	<i>Groupe exposé</i>	<i>Œufs d'helminthe (NPP/ml)</i>	<i>Coliformes fécaux(NPP/100 ml)</i>
A	Irrigation de cultures Pouvant être consommées Crues, terrain de sport, parc public.	≤ 1	≤ 1000
B	Irrigation de cultures céréalières, industrielles, de fourrages, d'arbres fruitiers et de pâturages.	≤ 1	Pas de recommandation standard
C	Irrigation localisée de la catégorie B, sans exposition possible avec les travailleurs ou le public.	Non applicable	Non applicable

II.1 Généralités sur le traitement biologique des eaux usées

Le traitement biologique des eaux usées est basé sur l'activité des bactéries. Son principe de fonctionnement consiste à éliminer les effets sensoriellement perceptibles ainsi que certains éléments chimiques présents dans l'eau [21].

Ce traitement se déroule sur plusieurs étapes. Au passage il faut noter que l'étape 1 et l'étape 2 se déroulent l'une sans l'autre ou les deux à la fois.

a-Traitement aérobie :



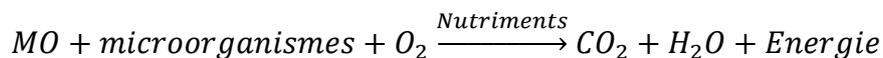
b-Traitement anaérobie :



II.1.1 Principe de l'épuration biologique aérobie

L'épuration est réalisée par le métabolisme bactérien. Ce dernier est composé de :

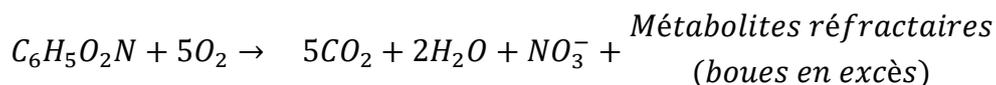
- Réaction de catabolisme :



- Réaction d'anabolisme :



- Réaction d'oxydation de biomasse (respiration endogène) :

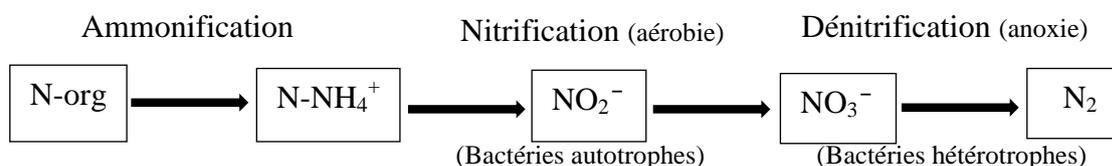


- Bilan d'oxygène :

$$\Delta DCO(\text{soluble}) = \Delta DCO(\text{biomasse}) + \Delta O_2(\text{utilisé}) [22]$$

-Élimination de l'azote :

Le processus d'élimination de ce composé nutritif par les bactéries des eaux usées se déroule en plusieurs étapes schématisées ci-dessous.



II.1.2 La croissance bactérienne

La croissance d'une biomasse de concentration X , à l'instant zéro, en présence d'un substrat biodégradable de concentration S , comporte quatre phases (figure II.1).

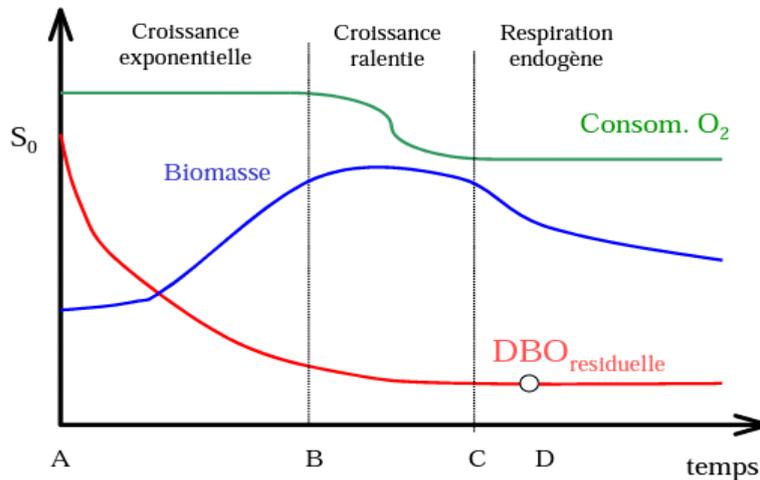


Figure II.1: croissance d'une culture bactérienne [23]

- **Phase de latence** : correspond à l'adaptation des micro-organismes au milieu nutritif. La vitesse de croissance de la biomasse est presque nulle.
- **Phase de croissance exponentielle** : c'est la phase où le taux de reproduction cellulaire atteint est maximal et reste constant en présence d'une concentration en substrat non limitante. La vitesse de croissance (1) et celle de la consommation du substrat (2) s'écrivent :

$$dX/dt = \mu_m X \quad (1)$$

$$dS/dt = -Y\mu_m X \quad (2)$$

Avec :

X : la concentration en matière organique active (g/l),

t : le temps en heure,

μ_m : taux de croissance maximale des micro-organismes par heure (h⁻¹),

S : substrat dégradé exprimé en taux de consommation d'oxygène (DBO₅ éliminée) en (g/l),

Y : masse (g) de cellules produites par unité (g) de substrat de concentration S . Y est le "rendement cellulaire".

- **Phase de stabilisation** : à ce niveau, le taux de croissance bactérienne (μ) s'annule et le nombre de bactéries vivantes reste constant. La stabilisation est attribuée à l'épuisement du substrat et il s'ensuit l'accumulation des déchets toxiques et l'évolution défavorable des conditions physico-chimiques tel que le pH.
- **Phase de respiration endogène** : la biomasse est dans la phase d'autolyse. Sa masse chute et la décroissance est proportionnelle à la concentration des micro-organismes S_a comme le montre l'équation (3):

$$dX_a/dt = -b_a S_a \quad (3)$$

Où :

b_a : taux de mortalité des micro-organismes par heure, il est de 0,18 à 20°C et de 0,135 à 13°C [23].

II.1.3 Modélisation de la croissance bactérienne

Le modèle mathématique le plus utilisé pour la quantification de la croissance bactérienne est le modèle de Monode exprimé par l'équation suivante :

$$dX/dt = \mu X \text{ avec } \mu = \mu_m S / (K + S), \text{ (valable pour un RPAC)}$$

Avec:

μ (h⁻¹) : taux de croissance à l'instant t.

S (g/l) : substrat dégradé exprimé en consommation d'oxygène (DBO₅ éliminée).

K (mg/l): concentration seuil au-dessus de laquelle le taux de croissance doit être dépendant de la concentration en substrat [24].

II.2 Les techniques de traitement biologique

On distingue plusieurs types de traitement biologique :

II.2.1 Traitement par boues activées

C'est au début du XX^{ème} siècle, et en s'appuyant sur les travaux de Louis Pasteur, qu'Edward Ardern et William Lockett donnent naissance au traitement biologique.

Ils constatèrent la formation d'agrégats bactériens lors de l'aération continue d'eaux d'égout. La présence d'oxygène augmente l'activité bactérienne, ce qui accélère la dégradation naturelle de la matière organique. Cette biomasse active prend le nom de « boue activée » [21].

Ce traitement passe par deux phases ; le contact de la biomasse et de l'eau usée dans un réacteur ensuite la séparation des solides de la phase liquide épurée par décantation.

Ce traitement est le plus répandu et son développement est dû aux excellentes performances de dépollution (rendement supérieur à 95%) qu'il réalise par rapport aux autres procédés existants. En contrepartie, suivant le type d'effluent à traiter, ce procédé peut être difficile à maîtriser pour le traitement de l'azote du phosphore ou en cas de variations importantes des flux à traiter [25].

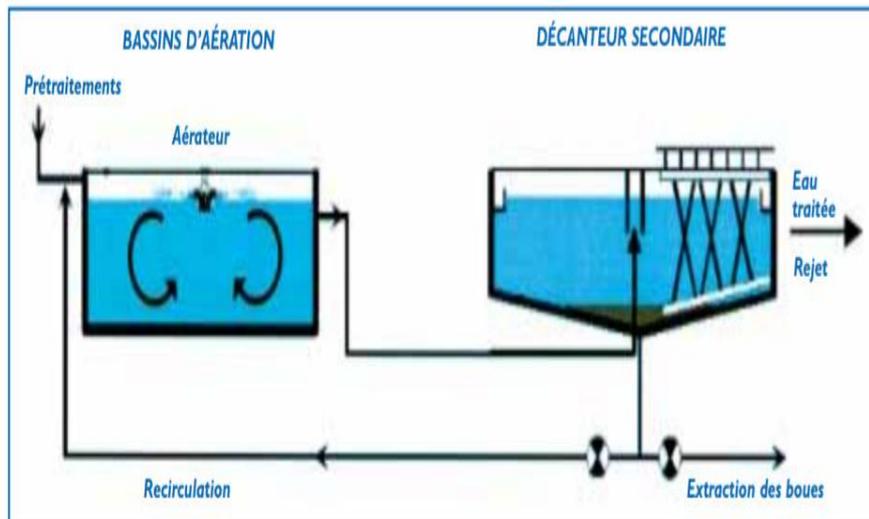


Figure II.2: synoptique d'une boue activée – aération prolongée [26].

II.2.2 Traitement par lagunage

Il fait appel à un stockage des eaux pour des temps de séjour relativement longs, au minimum plusieurs jours, parfois plusieurs mois pour optimiser des processus naturels d'autoépuration à l'aide de technologies peu sophistiquées à coût énergétique limité [27].

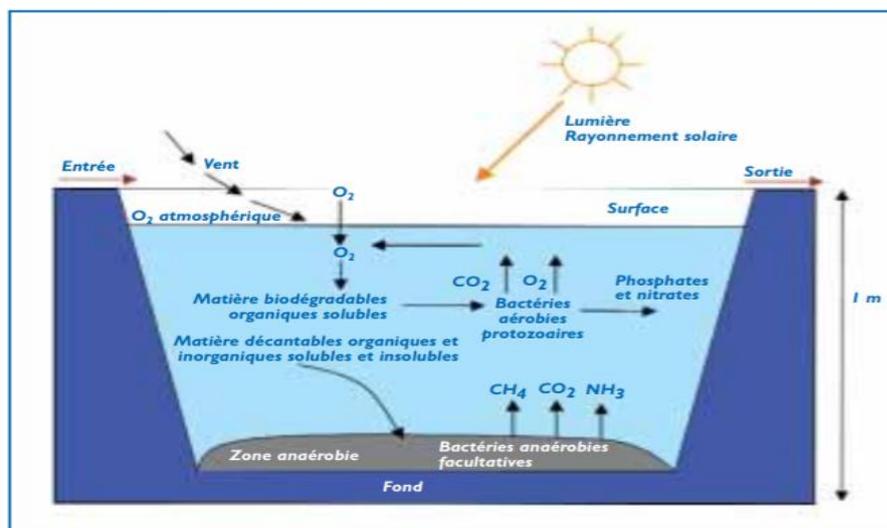


Figure II 3: les mécanismes mis en jeu dans un bassin de lagunage naturel [26].

Il existe quatre types de lagunes :

- a- **Les lagunes anaérobies** : ce sont des bassins assez profonds (2,5 à 5 m) où la dégradation a lieu en absence d'oxygène produisant ainsi du biogaz (CO_2 et CH_4). Ces lagunes permettent une réduction de 60 % de la DBO.
- b- **Les lagunes facultatives** : elles sont moins profondes (1,2 à 2,4 m) et combinent entre l'aérobiose et l'anaérobiose. La dégradation aérobie s'effectue dans les zones proches de la surface et la dégradation anaérobie dans les profondeurs de la lagune.
- c- **Les lagunes aérobies** : ou lagune de maturation. Elles sont aérées et la circulation de l'eau est artificielle. L'air favorise la dégradation des déchets. Les algues et les plantes se nourrissent des éléments dissous par les bactéries et se développent par photosynthèse en augmentant ainsi le taux d'oxygène dissous dans l'eau. Leur profondeur ne dépasse pas les 1,5 m.
- d- **Lagune à haut rendement** : elles sont constituées de bassins de 30 cm à 60 cm de profondeur seulement. L'eau est lentement agitée par des roues à aubes, ce qui entraîne une production intensive d'algue et d'oxygène. Ainsi la surface nécessaire pour les bassins de ce type peut être jusqu'à 5 fois plus petite par rapport aux autres lagunes. Elles nécessitent des conditions minimales de rayonnement solaire et de température [28].



Figure II.4 : schéma de principe de système lagunaire. [29]

II.2.3 Traitement par disques biologiques

Les micro-organismes se développent et forment un film biologique épurateur à la surface des disques minces en plastique montés sur un axe horizontal. Les disques étant semi émergés (environ 40% de la surface des disques), leur rotation permet alternativement l'oxygénation de la biomasse fixée et la dégradation de pollution [26, 30].

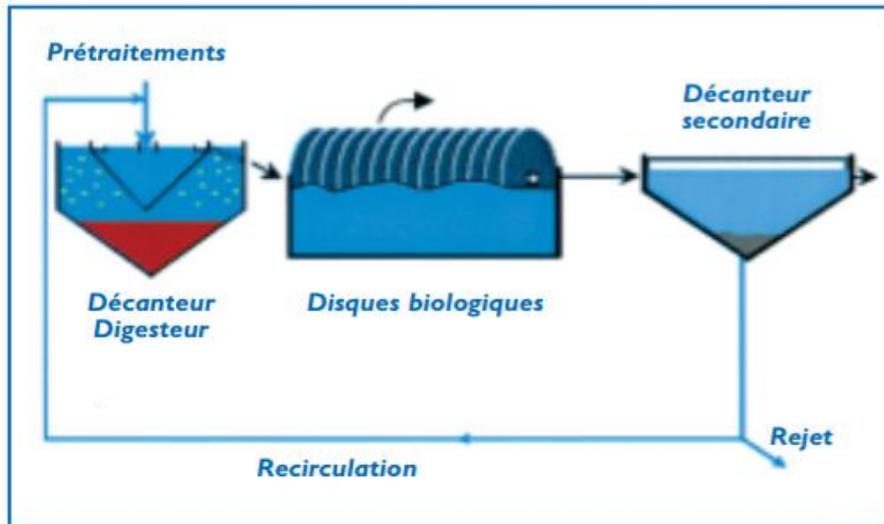


Figure II 5: synoptique d'une STEP à disque biologique [26].

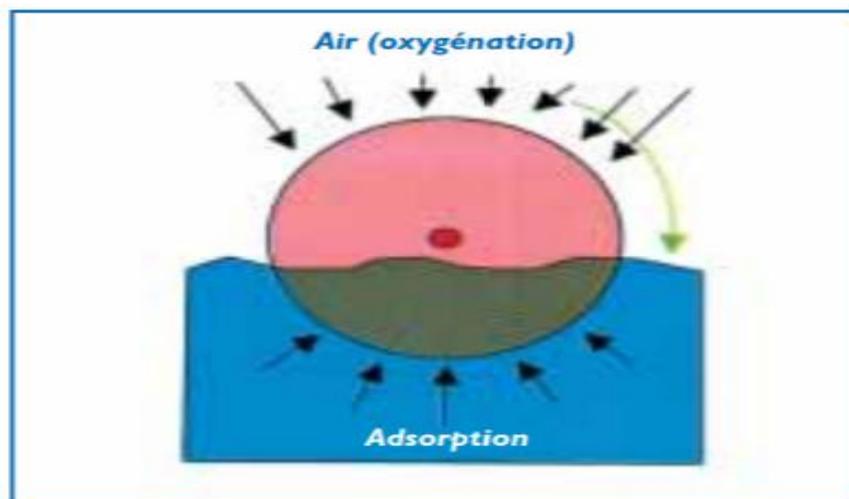


Figure II.6 : schéma de principe d'un disque biologique [26]

II.2.4 Traitement par biofiltre

La technologie de la biofiltration est habituellement trouvée dans des applications industrielles pour régler certains problèmes en traitement des eaux, de l'air et autres. Le premier biofiltre avait été introduit en Angleterre en 1893 mais cela fut développé en Allemagne et en Hollande vers les années 1955. Le premier usage de ce procédé a été dans le domaine de l'eau et c'est cela même le but de sa conception. En effet, le développement exponentiel de l'industrialisation a permis à ce que cette technicité soit diversifiée dans les secteurs suivants : pharmaceutique, agroalimentaire, industries chimiques. Son utilisation dans le traitement d'effluents gazeux est récente [31].

Dans la dépollution de l'air, cette dernière est employée pour réduire le dégagement d'odeurs indésirables en inhibant les composés organiques volatils (COV), le sulfure d'hydrogène (H_2S), les composés aromatiques, alcools, acides organiques par le biais des bactéries en aérobie. Initialement le biofiltre contenait le matériau filtrant constitué de roche, de scorie. Cependant, plusieurs matériaux ont été créés entre autre : le matériau inorganique (sable, gravier, géotextile, divers plastiques) et le matériau organique (copeaux de bois, compost, tourbe etc.) [31].

La biofiltration, de nos jours, est parmi les techniques biologiques la plus utilisée chez les industriels en raison de son rendement épuratoire, le faible coût d'opération, les besoins énergétiques sont moins et peu d'entretien. A travers ses avantages cités ci-haut, cette dernière aurait eu l'ampleur et se propagea dans le monde entier en 1990 [31].

Les premières stations d'épuration à biofiltre sont apparues dans les années 1970 et leurs exploitations pour le traitement des eaux usées urbaines ne se font que dans les années 1990.

Les avantages de cette technique sont :

- La possibilité d'échapper aux accidents de décantation des boues activées,
- Occupe moins du surface au sol,
- Sont plus faciles à installer dans des bâtiments fermés,
- Se prête bien à une construction modulaire,
- Temps de réaction plus court et permet d'envisager une optimisation automatique des paramètres de fonctionnement,
- Adaptation aux variations des eaux à traiter [32].

II.2.4.1 Principe de fonctionnement

Un biofiltre est un lit constitué d'un matériau filtrant auquel se fixent les microorganismes. En effet, ces organismes vivants y prolifèrent en formant une couche biologiquement active qu'on nomme (biofilm, biomasse, la zoogée, gazon biologique). Ainsi, la biofiltration peut-être aussi considérée comme étant une technique à biomasse fixée [33]. Cette méthode de traitement, est souvent aérobie ; cela signifie que l'apport en oxygène est nécessaire pour que les substances vivantes déclenchent l'opération de transformation des polluants. Ainsi, cette activité microbiologique ou bactériologique est un facteur clé en ce qui concerne l'efficacité du procédé. Pour cela, plusieurs facteurs influent sur le processus (la composition et la charge surfacique des eaux à traiter, le type de matériau, stratégie d'alimentation (percolation), l'âge de biomasse, la température, l'aération etc...). Tous les éléments évoqués ci-dessus, constituent les conditions opératoires pour un bon déroulement du procédé [31].

Le principe de fonctionnement d'un lit bactérien consiste à faire ruisseler les eaux usées préalablement décantées en utilisant le dispositif au-dessus de l'installation appelé sprinkler. Les eaux usées passent sur une masse de matériaux poreux servant le support aux microorganismes épurateurs [34]. Et l'installation comporte aussi l'élément de drainage, le système d'aération en bas du lit, le décanteur secondaire (lit à forte charge) et une conduite permettant le recyclage des eaux décantées [35].

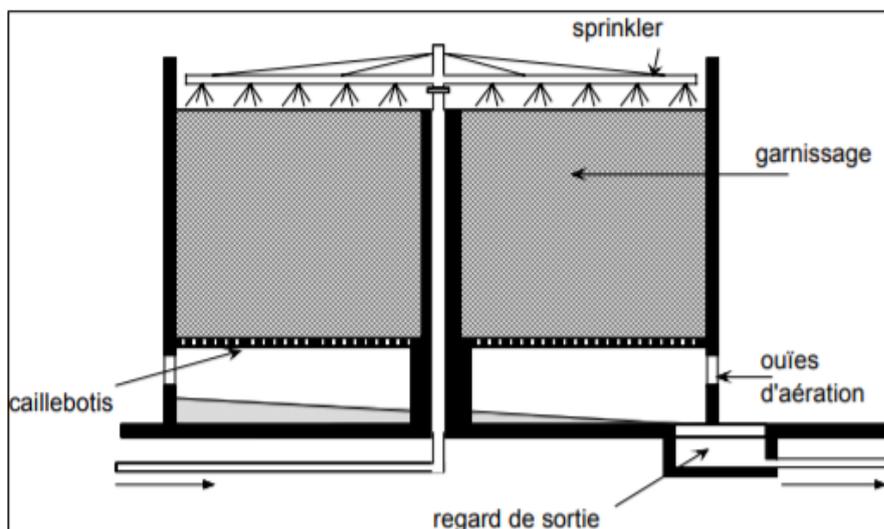


Figure II.7: lit bactérien [36].

La hauteur du lit bactérien à remplissage classique (cailloux) est de 1 à 3 m, celle du lit moderne (à remplissage à plastique, matière synthétique) est de 6m avec une grande surface spécifique environ $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ et un indice de vide de 90% qui permet la formation de biofilm sans inhiber le passage de l'air [35].

Dans les lits bactériens, la masse active des micro-organismes se fixe sur un support poreux inerte ayant un taux de vide à travers lequel est percolé l'effluent (lits minéraux comme la pouzzolane et le coke métallurgique, ou plastique [37]).

Les matériaux de remplissage peuvent être ordonnés ou en vrac et la vitesse d'écoulement de l'effluent ne doit être ni trop rapide, pour donner le temps suffisant à la digestion bactérienne de la pollution organique, ni trop lente pour permettre une bonne évacuation de MES en excès.

Le lit bactérien est plus performant qu'un procédé à boues activées car il élimine :

- 30 à 40 % des virus,
- 50 à 95 % des bactéries,
- 20 à 90 % des œufs d'helminthes,
- 83 à 99 % des kystes de protozoaires [38].

II.2.4.2 Les paramètres de fonctionnement du lit bactérien

L'aération : une aération est pratiquée soit par tirage naturel, soit par ventilation forcée. Il s'agit d'apporter l'oxygène nécessaire au maintien des bactéries aérobies en bon état de fonctionnement. Les matières polluantes contenues dans l'eau et l'oxygène de l'air diffusent, à contre-courant, à travers le film biologique jusqu'aux microorganismes assimilateurs.

Le film biologique comporte des bactéries aérobies à la surface et anaérobies près du fond de la colonne. Le sous-produit et le gaz carbonique produits par l'épuration s'évacuent dans le fluide liquide et gazeux [34].

Les microorganismes : certains de ces populations microbiologiques ont la faculté de dégrader les substances polluantes présentes dans les eaux résiduaires pour les convertir en eau, en dioxyde de carbone et en matières minérales dont l'effet polluant est moins pour les milieux récepteurs [39]. Parmi les organismes épurateurs, nous pouvons citer :

- **Les bactéries** : unicellulaire, ces organismes possèdent la structure interne la plus simple de toutes les espèces vivantes. Elles se multiplient en général par fission binaire. Ces cellules représentent la plus importante population de la communauté microbienne dans tous les procédés biologiques, souvent avec des concentrations qui dépassent 10^6 bactéries / ml [35]. Une grande partie du poids sec des microorganismes est constituée en général de carbone 50%, d'oxygène (20%), d'azote (10 à 15 %), d'hydrogène (8 à 10 %) et du phosphore (1 à 3%) [40].

- **Les protozoaires** : sont de structure plus complexe que celles des bactéries. La distinction des protozoaires est plus simple. Certains d'eux sont de redoutables prédateurs pour les bactéries. Ils ont la faculté de se déplacer et sont classifiés suivant leur mode de mouvement (nageurs, rampant) [39]. Ces organismes jouent un rôle important au cours du processus d'épuration par leur abondance et leur interaction avec les bactéries (compétition et prédation) [39].
- **Les algues** : ce sont les organismes photosynthétiques unicellulaires ou multicellulaires formant une population hétérogène. Les algues sont indésirables dans les sources d'eau car elles effectuent leurs odeurs et leur goût. Dans le traitement, on retrouve deux types de procédés uniquement : les lits bactériens ainsi que les bassins de lagunage, mais ce n'est que dans ces derniers qu'elles jouent un rôle bénéfique lors de l'épuration [39].

La qualité de matériau : il doit avoir une forte surface spécifique pour qu'il ait le maximum de surface biologiquement active, une bonne perméabilité à l'air et à l'eau et enfin la résistance à l'écrasement et à la corrosion.

La répartition de l'effluent sur le lit : celle-ci se réalise à l'aide d'un dispositif possédant plusieurs bras appelés **sprinkler** et se plaçant au dessus d'équipement auquel l'eau est distribuée uniformément à la surface du lit avec une vitesse modérée et avec mouvement rotatif [35]. L'aspersion ne doit pas être trop fine car il a été montré que le colmatage augmente avec la finesse d'aspersion. Le sprinkler est le système le plus adapté et le plus répandu avec un débit suffisant pour lui communiquer un mouvement de manière dynamique [41].

II.2.4.3 Classification des lits bactériens

Ils sont classifiés selon :

a. la charge

Les lits à faible charge : la charge hydraulique est inférieure à $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ et la charge en DBO_5 est de $0,08$ à $0,15 \text{ kg DBO}_5 / \text{m}^3.\text{j}$ et le rendement de ce type de lits est de l'ordre de 95 %. Les lits bactériens à faible charge possèdent des risques de colmatage et le coût élevé et peuvent éliminer l'azote.

Les lits à forte charge : la charge hydraulique est supérieure à $0,7 \text{ m}^3 / \text{m}^2.\text{h}$, et la charge en DBO_5 est entre $0,7$ et $0,8 \text{ kg DBO}_5 / \text{m}^3.\text{j}$. Cette classe de lits nécessite une recirculation qui assure :

- L'autocurage du lit,
- L'ensemencement des eaux décantées,
- La dilution des eaux à traiter.

Tableau II.1 Classification des lits bactériens

Type de lit	Charge organique kg DBO ₅ / m ³ .j	Charge hydraulique m ³ / m ² .h	Rendement d'élimination (%)
Forte charge	0.8-2	15-25	65-90
Faible charge	0.2-0.8	1-5	90-95

b- le matériau de remplissage

La masse active des microorganismes se fixe sur des supports poreux inertes ayant un taux de vide d'environ 50 % (la pouzzolane, le plastique, les roches, les cailloux). Ce sont les matériaux à travers lesquels on filtre l'effluent à traiter. De nombreux supports ont été utilisés ces dernières années pour remplacer le remplissage traditionnel des lits bactériens. Les nouveaux matériaux présentent un indice de vide important de l'ordre de 90% permettant la formation du film biologique sans inhiber le passage de l'air, uniformité permettant une meilleure distribution de l'effluent et enfin la résistance chimique.

Les lits à remplissage traditionnel : le matériau de remplissage ou garnissage de ces lits peut être la pouzzolane (roche volcanique à structure alvéolaire), le coke métallurgique (coke en gros morceaux, très résistant à la compression, ou le coke la houille), de la silice ou des galets occupant la partie intérieure du lit sur lequel vient se former le biofilm. Il est caractérisé par sa surface spécifique exprimée en m^2 / m^3 et un coefficient de vide qui est le rapport entre le volume du vide et le volume total du support s'exprimant en pourcentage. La surface spécifique et le taux de vide représentent les propriétés nécessaires d'un support ou garnissage, les deux grandeurs sont liées entre elles et jouent un rôle important dans la conception des réacteurs à cultures fixées.

Ces matériaux possèdent une surface spécifique de 90 à 105 m^2 / m^3 . La hauteur du support est d'environ 2 m. Lorsque le lit est à forte charge le taux d'épuration diminue (66 %) [37].

La pouzzolane :

Le nom de pouzzolane vient de la ville de Pouzzoles, un port Italien riche en sable volcanique, situé dans le golf de Naples au pied du Vésuve.

Chapitre II : Procédés de traitement biologique des eaux usées

C'est une roche siliceuse d'origine volcanique, faiblement agglomérée, friable, dont la couleur varie du gris au rougeâtre, utilisée depuis l'antiquité comme constituant secondaire des ciments et des mortiers.

Ce sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction, des produits manifestant des propriétés liantes.



Figure II.8: Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets de différentes industries. On distingue, soit des résidus de fabrication industrielle tel que le mach fers, cendres de bois ou d'houille, soit des débris de brique et de tuiles fabriquées avec des argile pures à des températures modérées.

Tableau II.2. Les caractéristiques chimiques de la pouzzolane naturelle [44]

Les composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₄	Cl
Les teneurs (%)	74.48	12.83	1.51	3.92	0.34	0	0

Tableau II.3. Les caractéristiques physique de la pouzzolane naturelle [44]

Caractéristiques physique	valeur
Masse volumique en (g/ cm ³)	0.98
Porosité en (%)	57.10

Les lits à remplissage plastique

Les matériaux plastiques sont synthétiques, ils n'existent pas dans la nature. Ils sont créés à partir de matières telles que le charbon, le pétrole, le bois. Ce sont de mauvais conducteurs d'électricité. Les garnissages plastiques sont apparus vers 1975. Ils permettent d'appliquer sur les lits bactériens des charges bien supérieures à celles qui sont pratiquées avec les matériaux traditionnels (cailloux, graviers, pouzzolane).

Ces matériaux permettent de réduire considérablement les risques de colmatage et présentent un coefficient de transfert d'oxygène plus élevé que ceux à remplissage traditionnel [42].

Ils ont une hauteur très importante par rapport au garnissage traditionnel, allant jusqu'à 12 m avec une surface spécifique développée de 150 à 220 m²/m³ et un pourcentage de vide élevé environ de 90 à 95 %. Ces lits peuvent traiter des charges volumiques de 1 et 5 Kg/m³.j [42]. Ces dispositifs sont destinés souvent pour les eaux usées industrielles, les charges hydraulique appliquées sont alors élevées et peuvent atteindre 10 m³/m².h, leurs performances de traitement sont meilleures, même les effluents contenant du phénol, seront épurés [43].

On peut distinguer deux types de présentation :

- Matériaux à remplissage ordonné,
- Matériaux à remplissage en vrac.

La durée de vie moyenne des lits à remplissage plastique est à l'ordre d'une dizaine d'années. Leur remplacement est occasionné par l'encrassement, l'écrasement, défaut de supportage, etc. [19].



Figure II.9 : exemple de matériaux de remplissage en vrac [19].

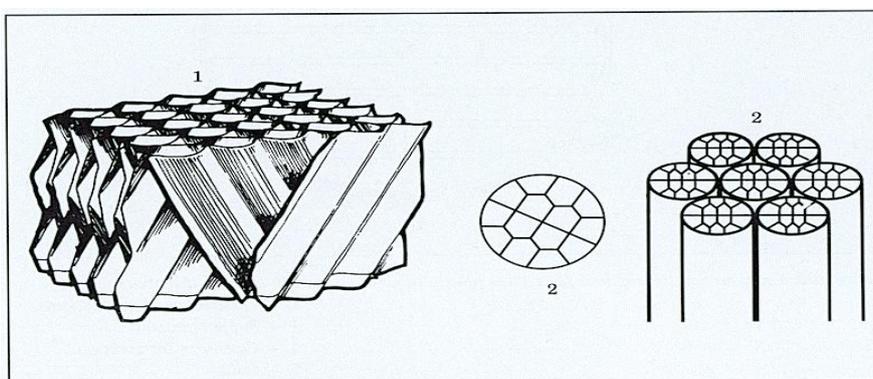


Figure II.10 : exemples d'un remplissage ordonné [19]

Tableau II.4 Types des matériaux plastiques et leurs caractéristiques [41]

matériau	Référence	Masse volumique (Kg/m ³)	Taux de vide (%)	Surface spécifique (m ² /m ³)
Polycarbonate	PC	1100	90	150
Chlorure de polyvinyle	PVC	30 à 90	93	220
polyéthylène	PE	40 à 80	97	220

II.2.4.4 Composition des effluents destinés pour la filtration biologique

Les eaux usées qui subiront le traitement biologique devront être essentiellement composées de matières organiques d'origine (animale et végétale), ces dernières doivent contenir un caractère de biodégradabilité cela veut dire la soumission de se transformer par les

activités biologiques des microorganismes et aux divers processus biochimiques de convection. La fraction de la matière biodégradable peut être structurée en deux groupes :

La matière aisément dégradable: elle est composée de substances solubles. Ces dernières ont la caractéristique de pouvoir être directement absorbées par les bactéries [35].

La matière lentement dégradable: elle est composée de substrats particuliers formés par un mélange de substances organique solides, colloïdales et solubles. Ces matières sont soumises à certains processus intermédiaires avant d'être absorbées par les populations bactériennes [35].

II.2.5 Les avantages et les inconvénients de chaque technique d'épuration

a- Boues activées

Ce dispositif est intéressant à partir de 400 équivalents habitants au minimum et peut aller jusqu'à un traitement de 100000 à 200000 équivalents habitants.

Tableau II.5 : Avantages et inconvénients du procédé à boues activées

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Emprise au sol réduite ; • Grande performance d'élimination de la DBO, la DCO et des MES. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement élevé ; • Sensibilité aux variations de charges hydraulique et organique ; • Nécessité d'un entretien fréquent des ouvrages (main d'œuvre qualifiée) ; • Coût d'exploitation (énergétique) élevé ; • Faibles performances en matière d'élimination des agents pathogènes.

b- Lits bactériens

Tableau II.6: avantages et inconvénients des lits bactériens

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Occupation au sol relativement faible ; • Bonnes performances en terme de réduction de la DBO, de la DCO et des MES ; • Faible consommation en énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement élevé ; • Ne supporte pas les variations de débit et de concentration des effluents ; • Nécessite un entretien fréquent des ouvrages (main d'œuvre importante) ; • Pollution olfactive ; • Nuisances par le développement des insectes.

c- Bio-disque

Tableau II.7: avantages et inconvénients du bio-disque

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none">• Très bonne réactivité en cas de surcharges par rapport aux boues activées;• Moins d'équipement électromécanique : un seul moteur par file ;• Consommation électrique faible.	<ul style="list-style-type: none">• Limitation de la capacité de la STEP à 100000 EH;• Possibilité de la pollution olfactive.

d- Bio-filtration

Tableau II.8: avantages et inconvénients du bio-filtration

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none">• Emprise au sol faible par rapport au procédé boues activées ;• Absence de clarificateurs secondaires;• Grande stabilité vis-à-vis des variations de charge;• Possibilité à traiter des eaux faiblement concentrées et froides;• Intégration architecturale aisée;• Modularité.	<ul style="list-style-type: none">• Limitation de la capacité de la STEP à 100000 EH;• Possibilité de la pollution olfactive.

III.1 Introduction

La filtration est un des procédés importants utilisés pour le traitement des eaux usées. Dans le traitement des eaux potables elle est utilisée pour purifier l'eau de surface alors que dans le traitement des eaux usées, le but principal de la filtration est de produire des effluents de qualité suffisante pour pouvoir être rejetés dans les eaux de surface. Les biofiltres sont également utilisés avec succès pour le traitement d'effluent gazeux.

A l'origine, les biofiltres (lit bactérien) étaient développés à l'aide d'une roche comme média filtrant, mais à l'heure actuelle, plusieurs types et formes de supports sont également utilisés, avec différents matériaux (média filtrant). Ce procédé est principalement utilisé pour le traitement de petites quantités d'eaux usées (petites communes, hôtels). Le principe de base dans un biofiltre est la biodégradation de polluants par les micro-organismes fixés sur le support du filtre [1].

La biofiltration est un traitement de l'eau utilisant la dégradation biologique, qui s'effectue généralement sur un biofilm fixé sur un solide (support). Il y a de nombreux avantages à ce type de traitement : les procédés biologiques de filtration nécessitent relativement peu d'entretien et aucun ajout de produits chimiques, de petites infrastructures, les coûts sont bas pour une élimination significative de la fraction des composés organiques de l'eau.

Des procédés de filtration biologique ont été recommandés comme un bon outil pour réduire les fractions biodégradables et assimilables du Carbone Organique Dissous (COD), mais également pour éliminer les composants non-dégradables, tels que les matières colloïdales [11].

Dans un système de biofiltration, les polluants sont éliminés grâce à la dégradation biologique. Avec la progression du processus de filtration, des micro-organismes (aérobie, anaérobie, bactéries facultatives; champignons, algues, protozoaires et autres) se développent sur la surface de la couche filtrante et forment un film biologique ou une couche visqueuse appelée biofilm. Le développement du biofilm peut prendre quelques jours ou quelques mois, selon la concentration affluente de matière organique. Le point crucial pour le bon fonctionnement d'un biofiltre est de contrôler et de maintenir en bonne santé la biomasse sur la surface du filtre. Les performances du biofiltre dépendent en grande partie des activités microbiennes. Une source constante des substrats (substance organique et de nutriments) est donc nécessaire pour son bon fonctionnement et efficacité [3].

Il existe un certain nombre de technologies de biofiltres, utilisant une variété de matériaux, y compris la tourbe, les cailloux, la pouzzolane, le plastique, le charbon et la mousse, ainsi que différents microorganismes (bactéries, champignons, algues).

Le biofiltre peut être utilisé comme un système à passage unique ou peut incorporer la recirculation. Les systèmes de biofiltration présentent un certain nombre d'avantages et de limites, lesquels varient en fonction du biofiltre utilisé [7].

III.2 Présentation du dispositif expérimental

Dans ce chapitre nous présentons le schéma du dispositif expérimental que nous avons envisagé pour l'étude du traitement des eaux usées par biofiltration. Il est constitué d'une colonne en PVC.

Le dispositif doit être instrumenté par les équipements suivants :

- Sonde de température ;
- Sonde pH ;
- Sonde conductivité.
- Pompe de recirculation
- Pompe doseuse
- débitmètre

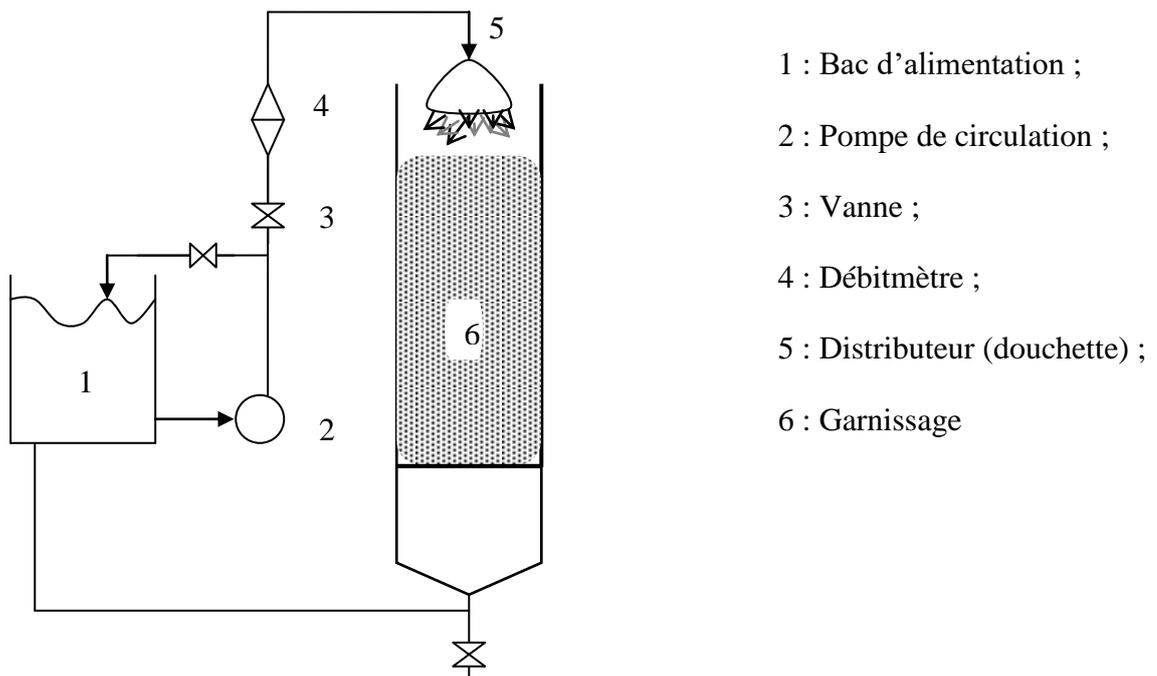


Figure III.1: dispositif expérimental.

Les analyses physico-chimiques et microbiologiques des échantillons de l'influent au point 1 et de l'effluent au point 2 doivent se faire pendant le fonctionnement du dispositif selon les méthodes standards au niveau du laboratoire et selon les équipements disponibles pour pouvoir étudier les performances épuratoires de ce dispositif expérimental.

a- Porosité du garnissage

Une fois la colonne remplie de pouzzolane, on note la hauteur H pour déterminer le volume occupé par la phase solide. On rajoute de l'eau de robinet jusqu'à ce que la phase fluide occupe les espaces vides entre les grains de pouzzolane et on note le volume de liquide. La porosité ou taux de vide, est défini comme le rapport entre le volume libre (volume non occupé par la phase solide) et le volume total de la couche:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume d'eau nécessaire à la saturation}}{\text{Volume total du lit}} \quad (1)$$

Le volume d'eau nécessaire à la saturation est égal à 4 litres

Le volume total du lit : $V_t = [3.14 (0.105)^2/4] \times 0.865 = 7.143 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Le volume du matériau saturé : $V_m = V_t - 4 = 3.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

La porosité du support a été calculée, $\varepsilon = 56\%$

b- Densité et masse volumique

La masse volumique apparente d'un matériau est mesurée en effectuant le rapport masse sèche sur volume. Cette mesure prend en compte dans l'estimation du volume, les vides ménagés par la porosité du matériau.

L'augmentation de volume et de masse provoquée par l'introduction du matériau dans une éprouvette d'eau permet d'estimer sa masse volumique réelle, c'est-à-dire le rapport entre masse de matériau sec et le volume qu'il occupe sans prise en compte des vides. La densité s'obtient en faisant le rapport entre la masse volumique réelle du matériau ρ_m et celle de l'eau ρ_e à une température donnée.

$$\rho_m = \frac{\Delta \text{masse}}{\Delta \text{Volume}} \quad (2)$$

$$d = \frac{\rho_m}{\rho_e} \quad (3)$$

c- Diamètre des grains

Le diamètre des cailloux de pouzzolane utilisé est compris entre 5 mm et 15 mm. La répartition des grains sur la surface de la colonne a été faite en essayant de minimiser le vide et de veiller sur une répartition homogène afin d'éviter les chemins préférentiels.

III.2 Calculs théoriques [45]

- **Expression de la charge hydraulique et volumique**

1. La charge hydraulique est plus connue sous le terme de vitesse de passage de l'eau dans le lit bactérien est définie comme suit:

$$C_h = \frac{\text{débit à l'entrée du biofiltre}}{\text{surface utile de filtration}} = \frac{Q}{A\varepsilon} \quad (4)$$

Avec :

C_h : Charge hydraulique ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ou m/h),

Q : débit d'effluent à traiter (m^3/h),

A : surface transversale de la colonne (m^2) ;

ε : taux de vide

2. La charge volumique ou charge en DBO_5 par volume de médium filtrant et pendant un temps donné est définie comme étant :

$$C_v = \frac{\text{charge en DBO}_5}{\text{Volume du médium}} = \frac{Q.S}{V} \quad (5)$$

Avec :

C_v : Charge volumique ($\text{kg DBO}_5/\text{m}^3 \text{ médium } .\text{j}$),

Q : débit d'effluent à traiter (m^3/j),

V : Volume de médium filtrant (m^3),

S : Concentration en DBO_5 des eaux usées à traiter (kg/m^3).

- **Equations de dimensionnement**

Chapitre III : Présentation du dispositif expérimental et calcul théorique

En 1957, **W.E.HOWLAND** avait dérivé théoriquement la durée de percolation autour d'une sphère, et montré que cette durée est proportionnelle à $H/C_h^{0.67}$, avec une constante de

proportionnalité elle-même liée à la viscosité (et donc à la température) du liquide et au rayon des sphères. L'équation de HOWLAND, donne :

$$\theta_1 = C \cdot H/C_h^{0.67} \quad (6)$$

θ_1 : Temps de séjour moyen du liquide (s) ;

C : Constante de proportionnalité ;

H : Hauteur du lit (m) ;

C_h : Charge hydraulique (m/h).

Ce chercheur a également déduit de son équation celle donnant la fraction restante S_1/S_0 , c'est-à-dire l'équation connue sous le nom de SCHULZE:

$$S_1/S_0 = e^{-K \cdot H/C_h^{0.67}} \quad (7)$$

Avec :

S_0 : Concentration en DBO₅ de l'eau usée à l'entrée du lit (mg/l) ;

S_1 : Concentration en DBO₅ de l'eau usée à la sortie du lit (mg/l) ;

K : Constante cinétique globale de biodégradabilité;

H : Hauteur du lit (m) ;

C_h : Charge hydraulique (m/h),

Dans cette équation, il est délicat de donner des dimensions à la constante cinétique globale de biodégradabilité K, car elle contient une constante biocinétique vraie et la constante de proportionnalité de HOWLAND, ainsi qu'un coefficient de forme. Si toutefois on exprime H en m et C_h en m/j, la constante globale de biodégradabilité K vaudra (en système décimal) **0.69<K<1.03**.

Cette équation permet déjà le calcul d'un lit bactérien, puisque S_1/S_0 est liée au rendement épuratoire. Selon elle, le rendement épuratoire n'est pas fonction de la charge organique mais seulement de la charge hydraulique. Elle ne tient pas compte de la température, qui a un effet sur K, et aussi sur la composition de la communauté bactérienne.

En 1960, **SCHULZE** a prétendu que la biomasse est constante dans le biofilm (cela est acceptable pour un lit à moyenne ou à forte charge).

En outre, il a supposé que la cinétique est d'ordre 1 (ce qui est valable pour un lit à faible charge). On parvient à des lois simples :

$$dS/dt = -KS \rightarrow S_1/S_0 = e^{-K\theta_l} \quad (8)$$

S : la concentration de substrat au niveau atteint par le liquide percolant après un temps t.

En 1973, **BRUCE** a proposé la relation suivante :

$$\text{Log} \frac{S_1}{S_0} = -0.0058 \frac{\sigma H}{C_h^n} \quad (9)$$

Où

σ : surface spécifique du support (m^2/m^3)
 n : exposant caractéristique du support.

On voit que $\sigma \cdot 0.0058 = 0.69$ à 1.03 c'est-à-dire que l'équation de BRUCE explique la valeur de σ qui n'est pas précise chez HOWLAND d'où $120 < \sigma < 180$ (m^2/m^3).

Pour un support classique, HOWLAND donne $n = 0.67$, qui n'est pas toujours le cas.

ROESLER a donné une équation empirique simple $n = f(\sigma)$.

$$n = 0,91 - 21,48/\sigma \quad (10)$$

SINKOFF donne σ en fonction de d (diamètre moyen des cailloux, en cm) et de la porosité ε exprimé en %.

$$\sigma = 6 (100 - \varepsilon) / d \quad (11)$$

OLESZKIEWICZ en 1985 décrit un modèle de charge utilisé pour les systèmes de biofiltration. La charge en DBO_5 à l'entrée d'un système de biofiltration est le paramètre majeur déterminant la qualité de l'effluent. La forme de ce modèle, supposant que la biodégradation de la matière organique se fait dans un réacteur où l'écoulement est du type piston et selon une réaction d'ordre 1, est la suivante :

$$S_1/S_0 = e^{-K/C_v} \quad (12)$$

Où :

C_v : Charge volumique à l'entrée du biofiltre ($kg\ DBO_5/m^3\ medium \cdot j$),
 K : Constante cinétique globale de biodégradabilité.

Sur le plan théorique, ces formules ont l'inconvénient de ne pas prévoir de limite à la capacité épuratoire d'un lit bactérien. Néanmoins, pour les lits à moyenne ou faible charge, les équations de SCHULZE, dans leur simplicité, sont celles qui représentent le mieux la cinétique.

L'incorporation par SCHULZE la technique de recyclage de l'eau traitée dans le procédé a pour but d'améliorer les performances de l'élimination de la DBO. Dans les lits à remplissage

Plastique, il permet d'augmenter la charge hydraulique ce qui améliore le mouillage du matériau.

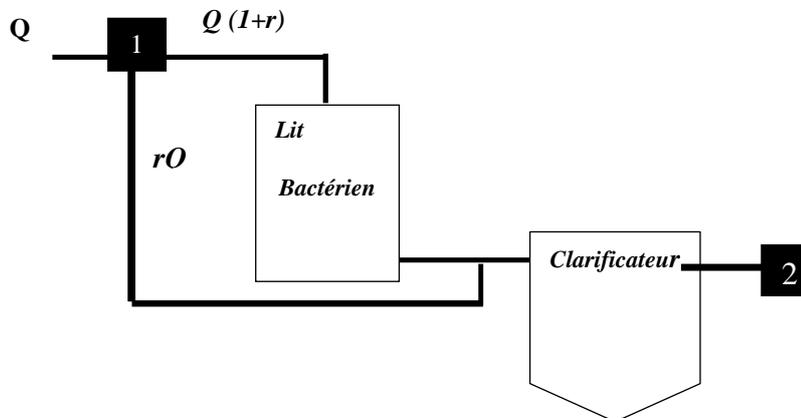


Figure III.2 : procédé de traitement par lit bactérien avec recyclage

Dans l'approche théorique nous allons utiliser les résultats expérimentaux présentés dans le mémoire de Master de DAHBI F.Z pour évaluer la constante de biodégradabilité des matériaux utilisés

Tableau III.1 : Résultats expérimentaux d'après [46]

Pouzzolane	H(cm)	Q=10 (l/h)		Q=16 (l/h)		Q=20 (l/h)		Q=25 (l/h)	
		Q _r =0.181(l/mn)	48	Q _r =0.307(l/mn)	28.8	Q _r =0.346(l/mn)	48	Q _r =0.444(l/mn)	28.8
	40	432	48	364.8	28.8	412.8	48	403.2	28.8
	80	-	-	326.4	9.6	393.6	9.6	345.6	19.2

Q : débit d'alimentation et Q_r : débit de recyclage

Calcul de la charge Hydraulique

$$C_h = \frac{Q(1+r)}{A\varepsilon}$$

Le taux de vide ε de la pouzzolane utilisée a été estimé à 55.88 %

Calcul de la section A de la colonne $A = \pi D^2 / 4$

Sachant que D= 14 cm, A= 0.015386 m²

Calcul du taux de recyclage r:

$$r = Q_r / Q$$

Tableau III.2 : Calcul du taux de recyclage

Q (l/h)	10	16	20	25
Q _r (l/mn)	0.181	0.307	0.346	0.444
r	1.086	1.151	1.038	1.065
C _h (m ³ /m ² /h)	2.426	4.0	4.740	6.00

Calcul de la constante globale de biodégradabilité

La constante globale de biodégradabilité se calcule à partir de l'équation de SCHULZE :

$$S_1/S_0 = e^{-K.H/C_h^{0.67}}$$

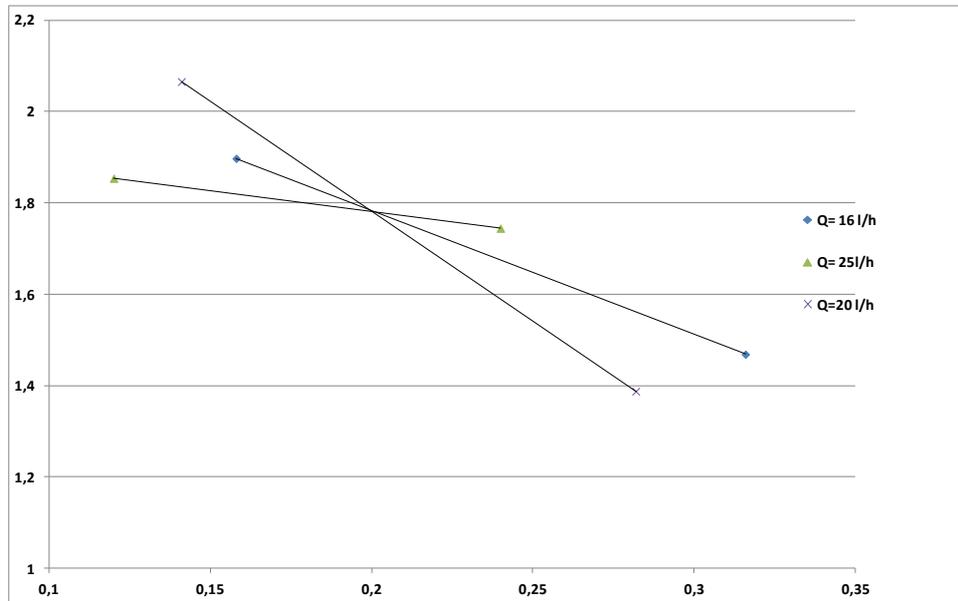
$$\text{Log}(S_1/S_0) = -K.H/C_h^{0.67}$$

A partir des tableaux III.1 et III.2, nous calculons les différentes valeurs de l'expression précédente et qui seront reportées sur le tableau III.3.

Tableau III.3 : résultats des calculs

C_h (m/h)	2.426		4.0		4.740		6.00	
$C_h^{0.67}$	1.8108		2.5315		2.8364		3.3217	
H (m)	0.40	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8
$S_1/S_0(x100)$	111.1	-	78.9	29.4	116.2	24.4	71.4	55.5
$\text{Log} [(S_1/S_0) \times 100]$	2.0457	-	1.8970	1.4683	2.0652	1.3873	1.8536	1.7443
$H/C_h^{0.67}$	0.221	0.441	0.158	0.316	0.141	0.282	0.120	0.240

A partir des valeurs représentées sur le tableau III.3, on trace la fonction $\text{Log} [(S_1/S_0) \times 100] = f(H/C_h^{0.67})$ pour chaque débit pour déterminer la pente qui représente la constante globale de biodégradabilité.



Graphe III.1 : Représentation des variations de $\text{Log} [(S_1/S_0) \times 100] = f(H/C_h^{0.67})$ pour chaque débit.

Tableau III.4 : Constante globale de biodégradabilité en fonction de la charge

C_h (m/h)	2.426	4.0	4.740	6.00
Pente	-	2.713	4.807	0.910

A partir de ce tableau, on peut tirer la valeur moyenne de la constante K :

$$K_{\text{moy}} = 2.81 \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, nous constatons que le traitement des eaux usées par procédé biologique sur un lit bactérien nécessite beaucoup d'expériences et de calculs pour comprendre certains phénomènes liés à l'hydrodynamique avant le traitement biologique.

L'écoulement du liquide à travers le lit est très important car il conditionne le transfert de matière et la cinétique biochimique. La porosité du milieu et la surface spécifique doivent jouer un rôle important sur le temps de séjour du liquide dans le lit bactérien, plus la surface spécifique est élevée et plus le biofilm sera important ce qui favorise un développement d'une biomasse épuratrice importante.

La réalisation d'un dispositif expérimental de traitement des eaux usées au niveau du laboratoire a été initiée et sera un début pour les futurs projets de fin d'études. Notre contribution quoique faible à cause de la conjoncture actuelle nous a permis de faire une ébauche concernant la mise en place de l'équipement, la partie théorique et le calcul de dimensionnement.

L'idée de base a été initiée et nous souhaitons qu'il y aura une continuation dans ce domaine et surtout poursuivre l'objectif de valorisation des matériaux locaux tel que la pouzzolane et les déchets de PVC qui sont disponibles et bon marché.

L'ambition

L'ingénieur cherche toujours à s'ouvrir un passage et à se situer au-delà, tandis que le bricoleur, de gré ou de force, demeure en-deçà, ce qui est une autre façon de dire que le premier opère au moyen de concepts, le second au moyen de signes... Pour le bricoleur, il s'agit de messages en quelque sorte prétransmis et qu'il collectionne... l'homme de science escompte toujours l'autre message...

Claude LEVI-STRAUSS
"La Pensée Sauvage

Les références bibliographiques

[1] : Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois –Rivières Janvier 2008. La caractérisation microbiologique et possibilités d'amélioration du biofiltre de Norsk-Hydro CANADA INC pour l'enlèvement d'ammoniac.

[2] : Thèse sur « le traitement d'effluents concentrés par cultures fixées sur Gravier ou la pouzzolane » soutenu le 13 décembre 2001 à l'université de Montpellier, Faculté des sciences et techniques du LANGUEDOC France.

[3] : M. MARCEL, CHARTIER, les types de pollution de l'eau, 04-06/ 1974, Norois, www.persee.fr, pp183-193.

[4] : Traitement biologique des eaux résiduaires par Jean – Claude Boeglin publié en 2008 à l' Institut de recherche hydrologique (IRH) et de l'Environnement de Nancy, France .

[5] : BERLAND, J.M, Boutin , Molle Pand COOPER « les procédés extensifs d'épuration des eaux usées » publié par Office des Publications des Communautés Européennes 2008, Luxembourg.

[6] : Mémoire de MASTER par ZAHIR BAKIRI, soutenu le 03 / 03/ 2007, Faculté des sciences de l'ingénieur, département de Génie des procédés, Université FERHAT ABBAS DE SETIF ALGERIE.

[7] : les Procédés unitaires biologiques et traitement des eaux, Institut de Chimie Industrielle, Centre universitaire de Mostaganem 3^e édition 2017, Professeur Mohand-Said OUALI.

[8] : les procédés extensifs d'épurations des eaux usées. Commission Européenne Waterguide fr.pdf Mise en œuvre de la directive du Conseil n° 91/271 du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires, France.

[9] : Assainissement Collectif www.puy-de-dome.fr, consulté le 17 /03/2020

[10] : Administration de la gestion de l'eau /Luxembourg www.eau.public.lu , consulté le 28 /03/2020.

- [11] : Thèse « traitement des eaux usées industrielles par des procédés membranaires » soutenu le 08/12/2018 à l'université de Montpellier (Ecole Doctorale, Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, eau).
- [12] : Mémoire « Etude comparative de performances d'un lit bactérien à garnissage en pouzzolane et à garnissage plastique » soutenu le 16/06/2015, université ABOU BELKAI, département d'hydraulique Algérie.
- [13] : CEMAGREF (2007), département Milieux Aquatique, qualité et rejets (Unité de Recherche Qualité des eaux et Prévention des Pollutions), groupement de LYON, France 3bis, Quai Chauveau-CP 220.
- [14] : Développement durable « traitement des déchets, valorisation, élimination, Edition Ellipses 2009, Professeur Ahmed ADDOU, Université de Mostaganem www.editions-ellipses.fr
- [15] : C.CARDOT, 2005, le traitement de l'eau procédés physico-chimiques et biologiques cours et problèmes résolus, niveau B, France, ellipses, 242 p, Technosup.
- [16] : Thèse V.G20RGOIS, publiée en 1988, épuration par cultures fixe sur support géotextile, Ecole nationale de biotechnologie, Paris, France 195 p.
- [17] : Société publique de gestion de l'eau www.spge.be, consultée le 02/05/2020
- [18] : <https://www.elmwatan.com>, publié le 11/02 /2019, consulté le 07/02/2020
- [19] : M.MARCEL, CHARTIER, les types de pollution de l'eau, le 04/06/1974 www.persee.fr, consulté le 10/02/2020.
- [20] : www.suezwaterhandbook.fr, consulté le 11/03/2020
- [21] : www.wikiwater.fr, consulté le 14/05/2020
- [22] : BLIEFERT, PERRAUD, 2009, chimie de l'environnement air, eau, sols, déchets, 2ème édition, Bruxelles, Boeck université, 478 p. [48] : Y. RACAULT, F. SEGUERT, 2004,

- [23] : base de dimensionnement des stations d'épuration rurales, éléments de conception et de dimensionnement des lits bactériens,17-19/05/2004, Toulouse, France, 18 p.
- [24] : Degrémont, 1978, Mémento technique de l'eau, huitième édition, France, 1200 p, technique et documentation.
- [25] : Y. ALKANEJ, 2017, recherche sur les méthodes et techniques appliquées au séchage des boues des STEP, thèse doctorat, hydraulique, université Badji Mokhtar, Annaba, 180 p.
- [26] : L.PASQUINI, 2013, micropolluants issus de l'activité domestique dans les eaux urbaines et leur devenir en station d'épuration, thèse doctorat, géosciences, France, université de Lorraine, 298 p.
- [27] : N.BERNET, traitement biologique des eaux usées, INRA-laboratoire de biotechnologie de l'environnement, Narbonne.
- [28] : H.DHAOUADI, 2008, les procédés biologiques d'épuration, université virtuelle de Tunis.
- [29] : J.M.BERLAND, 2014, traitement des eaux résiduaires des agglomérations-filières intensives, référence : C5222 V1.
- [30] : C. BASSOMPIERRE, 2007, procédés à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles, thèse doctorat automatique, Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 232 p.
- [31] : J. BONTOUX, B. PICOT, 1994, canada, volume 29, possibilités et limites des bassins lagunaires dans l'épuration des eaux usées.
- [32] : F.Z. DEHBI, 2015, étude comparative des performances d'un lit bactérien à garnissage en pouzzolane de beni Saf et d'un lit bactérien à garnissage plastique, mémoire Master, hydraulique, Tlemcen, université Abou Bakr Belkaid, 195 p.
- [33] : A. BECHLAGHEM, 2013, étude de faisabilité de réutilisation des eaux usées issues de la STEP de Chlef à des fins agricoles, mémoire Master, technologie de traitement des eaux, université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 119 p.
- [34] : Y. RACAULT, F. SEGUERT, 2004, base de dimensionnement des stations d'épuration rurales, éléments de conception et de dimensionnement des lits bactériens,17-19/05/2004, Toulouse, France, 18 p.
- [35] : N. A. BENSAYAH, I. LEKHAL, 2017, l'étude des systèmes de collecte et épuration des eaux usées de groupement urbain de Tlemcen, mémoire Master, eau, sol et aménagement, université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 155 p.

[36] : Kh. ADJEROUD, 2016, étude physico-chimique et organique des eaux usées de la ville d'Ain Beida, et leur impact sur l'irrigation, mémoire Master, hydraulique urbaine, université Larbi Ben M'hidi- Oum El Bouaghi, faculté des Sciences et Sciences Appliquées, Oum El Bouaghi, 115 p.

[37] : BLIEFERT, PERRAUD, 2009, chimie de l'environnement air, eau, sols, déchets, 2ème édition, Bruxelles, Boeck université, 478 p. [37] :J.M.BERLAND, 2014, traitement des eaux résiduaires des agglomérations-filières intensives, référence : C5222 V1.

[38] : C. BASSOMPIERRE, 2007, procédés à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles, thèse doctorat automatique, Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 232 p.

[39] : J. BONTOUX, B. PICOT, 1994, canada, volume 29, possibilités et limites des bassins lagunaires dans l'épuration des eaux usées.

[40] : www.eaudumaroc.com , consulté le : 20/04/2020 [7] Dauphin, S., 1998
Connaissance et contrôle du fonctionnement des stations d'épuration, intérêt et limites des moyens
métrologiques actuels : application à la gestion hydraulique d'un décanteur secondaire.
-Thèse : Faculté des sciences et techniques de l'eau, Université Luis Pasteur de
Strasbourg, France.

[41] : Hadj-Sadok, Z. M., 1999
Modélisation et estimation dans les bioréacteurs ; prise en compte des incertitudes :
application au
traitement de l'eau.
-Thèse : Faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Nice – Sophia Antipolis,
France.

[42] : Boari, G., Mancini, I.M. and Trulli, E., 1997
Technologies for water and wastewater treatment.
-Séminaires Méditerranéens, Sér. A /n037, Università degli Studi della Basilicata
Dipartimento di
Ingegneria e Fisica dell 'Ambiente Potenza, Italy.

