

Cours

TRAITEMENT DES EAUX USÉES

***Mahmoud
BALI***



Avant-propos

Ce cours s'adresse aux étudiants de la troisième année Licence Génie de l'eau (LA3-GE) de l'Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux de Gabès.

Il met l'accent sur les principaux procédés physico-chimiques et biologiques de traitement des eaux usées couramment utilisés. Dans ce document, ces procédés d'épuration sont présentés de façon très simple pour permettre une compréhension aisée de la logique du traitement des eaux résiduaires et des différents mécanismes mis en œuvre.

Ce cours est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente quelques généralités sur les eaux usées.

Le deuxième chapitre expose les différentes phases de traitement des eaux résiduaires mises en œuvre au sein des stations d'épuration.

Le troisième chapitre est consacré à présentation des procédés anaérobies de traitement des eaux usées.

Le dernier chapitre présente les filières extensives d'épuration des eaux résiduaires.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des photos	
Introduction générale	2
Chapitre I : Généralités sur les eaux usées	4
I- Généralités sur les eaux usées	5
I-1- Introduction	5
I-2- Définition des eaux usées	5
I-3- Classification des eaux usées	5
I-3-1- Les eaux usées domestiques	5
I-3-2- Les eaux usées industrielles	5
I-3-3- Les eaux agricoles	6
I-3-4- Les eaux pluviales	6
I-4- Caractéristiques des eaux usées	6
I-4-1- Paramètres physico-chimiques	6
I-4-1-1- La température	6
I-4-1-2- Le potentiel Hydrogène (pH)	6
I-4-1-3- Les matières en suspension (MES)	7
I-4-1-4- La couleur	7
I-4-1-5- La conductivité électrique (CE)	7
I-4-1-6- L'oxygène dissous	7
I-4-1-7- La Demande Chimique en Oxygène (DCO)	7
I-4-1-8- La Demande Biologique en Oxygène (DBO)	8
I-4-1-9- La biodégradabilité	8
I-4-1-10- L'azote	8
I-4-1-11- Le phosphore	9
I-4-1-12- Les métaux lourds	9
I-4-2- Paramètres microbiologiques	9
I-5- Collecte des eaux usées	9
Chapitre II : Traitement des eaux usées	12
II- Traitement des eaux usées	13

II-1- Les différentes phases de traitement des eaux usées au sein d'une station d'épuration	13
II-1-1- Les prétraitements	14
II-1-1-1- Le dégrillage	15
II-1-1-2- Dessablage, déshuilage, dégraissage	15
II-1-2- Traitement primaire	16
II-1-3- Traitement secondaire : Epuration biologique	19
II-1-3-1- Introduction	19
II-1-3-2- Procédé à boues activées	21
II-1-3-3- Lits bactériens	28
II-1-3-4- Lits immergés	29
II-1-3-5- Disques biologiques	30
II-1-3-6- Biofiltres	31
II-1-4- Traitement tertiaire	34
Chapitre III : Procédés anaérobies de traitement des eaux usées	34
III- Procédés anaérobies de traitement des eaux usées	35
Chapitre IV : Filières extensives d'épuration des eaux usées	37
IV- Filières extensives d'épuration des eaux usées	38
IV-1- L'infiltration-percolation	38
IV-2- Les filtres plantés de roseaux	40
IV-3- Le lagunage	43
Conclusion générale	45
Références bibliographiques	46

Liste des figures

Figure 1 : Système de collecte unitaire avec un déversoir d'orage	10
Figure 2 : Réseaux (unitaire et séparatif) de collecte des eaux usées	11
Figure 3 : Système de collecte pseudo-séparatif	11
Figure 4 : Schéma d'une fosse septique	13
Figure 5 : Représentation schématisée d'une station d'épuration.....	14
Figure 6 : Dessableur – Dégraisseur	15
Figure 7 : Schéma simplifié d'un décanteur à flux vertical	17
Figure 8 : Schéma simplifié du principe de la décantation	18
Figure 9 : Décanteur rectangulaire à racloir	18
Figure 10 : Décanteur lamellaire	18
Figure 11 : Principe de l'épuration biologique aérobie	20
Figure 12 : Schéma de principe de la nutrition bactérienne	21
Figure 13 : Schéma type d'une installation à boues activées	22
Figure 14 : Schéma d'un lit bactérien en coupe verticale	28
Figure 15 : Schéma type d'une station d'épuration à lit bactérien	29
Figure 16 : Schéma type d'une station d'épuration à lit immergé	30
Figure 17 : Principe du fonctionnement des disques biologiques	31
Figure 18 : Coupe schématisée d'une installation à disques biologique	31
Figure 19 : Principe du fonctionnement d'un biofiltre	32
Figure 20 : Différentes phases de méthanisation	36
Figure 21 : Schéma simplifié du principe de fonctionnement de l'infiltration- percolation.....	38
Figure 22 : Schéma type d'une installation à procédé d'infiltration-percolation	39
Figure 23 : Schéma d'une coupe transversale d'un filtre planté à écoulement vertical..	42
Figure 24 : Schéma d'une coupe transversale d'un filtre planté à écoulement horizontal	43
Figure 25 : Schéma montrant le principe du fonctionnement de lagunage naturel.....	44

Liste des tableaux

Tableau 1 : Expression des charges volumiques et massiques	23
Tableau 2 : Type de charge d'une station	23
Tableau 3 : Formules de la production de boue biologique	24
Tableau 4 : Valeurs des coefficients a_m et b en fonction de la charge massique	25
Tableau 5 : Expression des paramètres concernant la boue	25
Tableau 6 : Différents paramètres de l'aération	27

Liste des photos

Photo 1 : Dégrileur manuel à grille oblique	13
Photo 2 : Décanteur à flux vertical	17
Photo 3 : Décanteur à flux horizontal	19
Photo 4 : Décanteur lamellaire	19
Photo 5 : Bassin d'aération	22
Photo 6 : Aérateur de surface à axe horizontal (Brosses)	26
Photo 7 : Aérateur à turbine	26
Photo 8 : Aérateur par diffusion d'air	26
Photo 9 : Clarificateur	27
Photo 10 : Sprinkler	28
Photo 11 : Lit immergé	29

Introduction générale

Devant une conjoncture de pénurie des ressources en eau et devant les problèmes environnementaux liés aux changements climatiques, plusieurs pays dans le monde se sont attachés à une réflexion profonde sur les politiques de gestion durable de ressources en eau afin de satisfaire les besoins croissants de la population sans pourtant compromettre l'environnement.

Le rejet des eaux usées non traitées ou mal traitées dans l'environnement entraîne des effets néfastes sur la biodiversité et la santé humaine. De ce fait, le traitement des eaux résiduaires est désormais une priorité et une nécessité incontournable afin de préserver l'environnement et la santé publique.

Le traitement des eaux usées vise à protéger l'environnement tout en favorisant une gestion durable de la ressource en eau grâce à la réutilisation des eaux traitées. Ce processus repose sur des séparations physiques, des optimisations chimiques et des transformations biologiques.

Dans une station de traitement des eaux usées, les schémas fonctionnels définissent une filière d'épuration adaptée au degré de traitement requis, ce qui guide le choix des procédés à mettre en œuvre. Le procédé optimal est celui qui garantit un effluent conforme aux normes de qualité physico-chimiques et microbiologiques, tout en minimisant les coûts et les besoins en maintenance.

Le traitement des eaux usées urbaines a pour principal objectif de réduire la demande biologique en oxygène (DBO), les matières en suspension (MES), ainsi que les polluants azotés et phosphatés [1].

Ces dernières années, la politique environnementale de la Tunisie s'est axée sur le concept du développement durable. La croissance démographique rend le traitement des eaux usées urbaines incontournable, si l'on veut préserver l'environnement et contribuer à compenser le déficit en eau. Cette politique s'est concrétisée par l'adoption d'une réglementation qui fixe les normes de rejets et de réutilisation des eaux usées traitées, et les types de traitement permettant d'atteindre ces normes. Actuellement, la Tunisie possède 115 stations d'épuration (STEP) réparties dans tous les gouvernorats. L'assainissement des eaux usées est devenu une priorité et une nécessité incontournable

afin de préserver la qualité des ressources en eau, l'environnement et la santé humaine. Il consiste à collecter les eaux résiduelles et à les débarrasser de leurs charges polluantes avant de les rejeter dans le milieu naturel ou avant de les réutiliser.

Il est admis que l'instauration d'un développement durable exige de mettre l'accent aussi bien sur les préoccupations socio-économiques qu'environnementales en tenant compte du facteur primordial à savoir l'eau. La croissance démographique et économique d'une part et les différentes menaces des changements climatiques globaux et la pollution d'autre part conduisent tous à une crise des ressources en eau disponibles.

Le traitement des eaux usées est crucial pour préserver les ressources naturelles, protéger la santé humaine et soutenir le développement durable. Elle permet de réduire les impacts des activités humaines sur les écosystèmes aquatiques en éliminant les contaminants, les microorganismes pathogènes et les substances toxiques. Par ailleurs, la réutilisation des eaux traitées contribue à diminuer la pression exercée sur les réserves en eau, notamment dans les régions soumises à un stress hydrique ou à des conditions de sécheresse. En favorisant une approche circulaire de la gestion des ressources, cette pratique s'impose comme une réponse efficace aux défis liés au changement climatique, à l'augmentation de la population et à l'urbanisation croissante. Ainsi, la mise en place de systèmes de traitement efficaces et adaptés constitue une priorité afin d'assurer une gestion durable et pérenne de l'eau.

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

I- Généralités sur les eaux usées

I-1- Introduction

Les eaux usées, qu'elles proviennent de différentes sources, représentent un effluent chargé de polluants pouvant constituer une menace sérieuse pour l'environnement et la santé des usagers. Il est donc crucial de ne pas les déverser directement dans la nature. Elles doivent plutôt être traitées dans une station d'épuration, où un maximum de contaminants sera éliminé pour assurer leur conformité avec les normes de rejet en vigueur.

I-2- Définition des eaux usées

Selon Rejsek [2], les eaux usées ou eaux résiduaires sont des eaux chargées de polluants physiques, chimiques ou biologiques provenant essentiellement de l'activité humaine susceptibles de contaminer les milieux dans lesquels elles sont déversées. Le terme « eaux résiduaires » désigne des eaux issues de diverses origines, ayant perdu leur pureté initiale, autrement dit leurs caractéristiques naturelles, en raison de leur contamination par des polluants suite à leur utilisation dans des activités humaines telles que domestiques, industrielles ou agricoles.

I-3- Classification des eaux usées

Selon l'origine des eaux usées, on distingue quatre grandes catégories : les eaux usées domestiques, les eaux usées industrielles, les agricoles et les eaux pluviales.

I-3-1- Les eaux usées domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles se répartissent en eaux ménagères (eaux de cuisine et de salle de bain) et sont chargées de solvants, de graisses, et de détergents et en eaux-vannes provenant des rejets des toilettes et sont chargées de matières organiques et azotées et de germes fécaux.

I-3-2- Les eaux usées industrielles

Les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des eaux usées industrielles varient en fonction du type de l'industrie dont elles sont issues. Ces eaux sont souvent

chargées de polluants toxiques et doivent faire l'objet d'un prétraitement en aval de l'industrie avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte.

I-3-3- Les eaux agricoles

L'agriculture constitue une source significative de pollution de l'eau, notamment en raison de l'utilisation d'engrais et de pesticides, et représente la principale origine des pollutions diffuses [3]. Les eaux agricoles provenant des terres cultivées, enrichies en nitrates et phosphates sous forme ionique ou en quantités excédant la capacité de rétention du sol et l'absorption des plantes, entraînent un ruissellement qui enrichit les nappes superficielles ainsi que les eaux des cours d'eau et des réservoirs en substances azotées et phosphatées.

I-3-4- Les eaux pluviales

Elles peuvent être chargées de divers polluants (huiles, hydrocarbures, résidus de pneu, métaux lourds) provenant essentiellement du ruissellement sur les toitures et les chaussées. Ces eaux chargées d'impuretés entraînent la dégradation de la qualité des ressources d'eau naturelles.

I-4- Caractéristiques des eaux usées

Les eaux usées contiennent plusieurs types de polluants dont la nature varie en fonction de leur provenance urbaine, industrielle ou domestique. Afin de caractériser les eaux usées, plusieurs paramètres physico-chimiques et microbiologiques peuvent être mesurés.

I-4-1- Paramètres physico-chimiques

I-4-1-1- La température

Il est essentiel de mesurer la température de l'eau, car elle influence plusieurs paramètres importants tels que la solubilité des sels et des gaz et les processus biologiques.

I-4-1-2- Le potentiel Hydrogène (pH)

Le pH est un paramètre fondamental pour évaluer la qualité et l'état de l'eau. Il affecte la solubilité des nutriments et des métaux dans l'eau, influençant ainsi la biodiversité aquatique. C'est un indicateur clé pour comprendre l'origine de l'eau.

I-4-1-3- Les matières en suspension (MES)

La mesure de la teneur en matières en suspension (MES) dans les eaux usées est un paramètre essentiel. Les MES constituent un indicateur clé de la charge polluante des eaux usées. Leur concentration reflète la présence de particules solides non dissoutes, souvent associées à des polluants organiques ou inorganiques. L'évaluation de la teneur en MES est cruciale pour dimensionner correctement les systèmes de traitement, tels que les bassins de décantation et les filtres.

I-4-1-4- La couleur

La couleur de l'eau est un paramètre important pour évaluer sa qualité et détecter les sources de contamination. La présence de couleur dans l'eau peut être causée par des polluants industriels (teintures, métaux lourds) ou des matières en suspension. La couleur peut interférer avec les processus de traitement de l'eau, notamment la désinfection ou l'adsorption sur charbon actif. Elle peut également indiquer la présence de composés qui nécessitent un traitement spécifique.

I-4-1-5- La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) de l'eau est une mesure clé pour évaluer sa qualité. Elle reflète la capacité de l'eau à conduire un courant électrique, directement liée à la concentration totale d'ions dissous (sels minéraux). La conductivité s'exprime en micro-Siemens par centimètre. La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau [4].

I-4-1-6- L'oxygène dissous

L'oxygène dissous est un paramètre fondamental pour évaluer la qualité de l'eau. Il représente la quantité d'oxygène moléculaire (O_2) dissous dans l'eau, exprimée généralement en milligrammes par litre (mg/L). Dans les stations d'épuration, la mesure de la teneur en O_2 dissous est cruciale pour garantir l'efficacité des traitements biologiques.

I-4-1-7- La Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La Demande Chimique en Oxygène est un paramètre clé dans l'évaluation de la qualité de l'eau usée. Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement

la matière organique et certains composés inorganiques présents dans l'eau. Elle est exprimée en mg/L.

I-4-1-8- La Demande Biologique en Oxygène (DBO)

La Demande Biologique en Oxygène constitue un indicateur clé pour évaluer la qualité de l'eau, notamment dans le contexte des eaux usées. Elle correspond à la quantité d'oxygène dissous requise par les microorganismes pour décomposer biologiquement les matières organiques présentes dans l'eau sur une durée spécifique, généralement de 5 jours à 20 °C (DBO₅). Exprimée en milligrammes par litre (mg/L), la DBO représente la charge en matières organiques biodégradables contenue dans un échantillon. La DBO aide à dimensionner et optimiser les installations de traitement biologique des eaux usées.

I-4-1-9- La biodégradabilité

La biodégradabilité représente la capacité d'un effluent à être dégradé ou oxydé par des micro-organismes impliqués dans les processus d'épuration biologique de l'eau. Elle est quantifiée par un coefficient K, calculé selon la relation :

$$K = DCO/DBO_5 \quad (1)$$

Les interprétations de ce coefficient sont les suivantes :

- **K < 1,5** : les matières oxydables sont majoritairement très biodégradables.
- **1,5 < K < 2,5** : les matières oxydables présentent une biodégradabilité moyenne.
- **2,5 < K < 3** : les matières oxydables sont faiblement biodégradables.
- **K > 3** : les matières oxydables sont considérées comme non biodégradables.

La valeur de K permet de guider le choix de la filière de traitement la plus adaptée [3].

I-4-1-10- L'azote

L'azote contenu dans l'eau peut se présenter sous deux formes principales : organique et minérale. L'azote organique regroupe des composés tels que les protéines, les polypeptides, les acides aminés et l'urée, généralement présents en faibles concentrations. En revanche, l'azote minéral, composé principalement d'ammoniaque (NH₄⁺), de nitrates (NO₃⁻) et de nitrites (NO₂⁻), constitue la majorité de l'azote total dans l'eau [5].

I-4-1-11- Le phosphore

Dans les eaux usées, le phosphore est présent sous forme de sels minéraux et de composés organiques issus de matières biologiques. Ce nutriment joue un rôle clé dans la croissance des micro-organismes en contribuant à la formation de nouvelles cellules. Il provient principalement des détergents domestiques et des fertilisants agricoles. Le phosphore contenu dans les eaux usées apparaît surtout sous forme d'orthophosphates.

Le rejet des eaux usées chargées d'azote ou du phosphore peut entraîner l'eutrophisation de certains milieux aquatiques comme les lacs et les cours d'eau.

I-4-1-12- Les métaux lourds

Les métaux lourds présents dans les eaux se manifestent sous différentes formes : colloïdale, soluble ou en suspension. Les métaux solubles apparaissent sous forme d'ions simples ou complexes, tandis que les substances colloïdales et les particules en suspension incluent des sels insolubles ou des composés liés à des matières organiques ou des particules argileuses [6]. Les métaux lourds les plus fréquemment trouvés dans les eaux usées sont : Le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn).

I-4-2- Paramètres microbiologiques

Les eaux usées renferment une diversité de micro-organismes issus des matières fécales (champignons, bactéries, virus, protozoaires, helminthes) dont certains sont pathogènes [7]. Les bactéries sont les microorganismes les plus communément rencontrés dans les eaux usées [8]. Les germes témoins de contamination fécale regroupent les coliformes totaux, les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux.

I-5- Collecte des eaux usées

L'évacuation des eaux usées domestiques, industrielles et pluviales doit être planifiée selon une approche stratégique prenant en compte divers critères socio-économiques. Ce processus repose sur un réseau hydraulique soigneusement conçu pour acheminer ces

eaux hors des zones urbaines dans des conditions optimales d'écoulement, tout en minimisant les nuisances pour la population environnante [9].

On distingue trois principaux types de système de collecte :

- Système de collecte unitaire ;
- Système de collecte séparatif ;
- Système de collecte pseudo-séparatif.

Dans le cas d'un réseau de collecte unitaire, les eaux usées domestiques et les eaux pluviales sont évacuées dans les mêmes canalisations. Des ouvrages de déviation sont répartis sur ce type de réseau pour permettre à la station d'épuration de ne pas recevoir un débit supérieur à sa capacité. Il s'agit des déversoirs d'orages (Fig. 1). Alors que dans le cas d'un système de collecte séparatif, les eaux domestiques sont collectées dans un réseau et les eaux pluviales dans un autre (Fig. 2). Le système pseudo-séparatif est conçu pour collecter à la fois les eaux usées et une portion des eaux de ruissellement provenant directement des habitations. Ce système distingue deux types des eaux pluviales :

- Les eaux pluviales issues des toitures et des cours intérieures, raccordées au réseau d'assainissement par les mêmes branchements que ceux des eaux usées domestiques ;
- Les eaux pluviales provenant des surfaces de voirie. (Fig. 3).

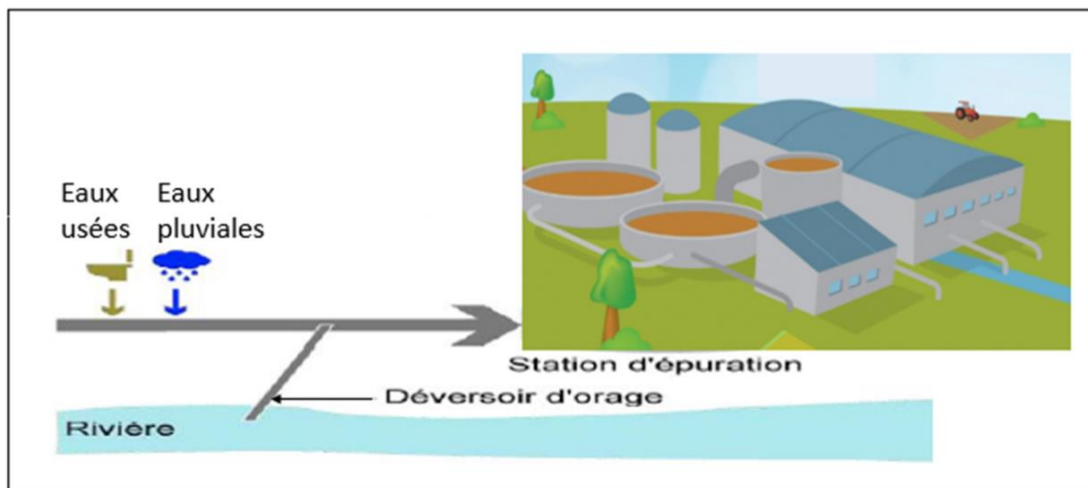


Figure 1 : Système de collecte unitaire avec un déversoir d'orage

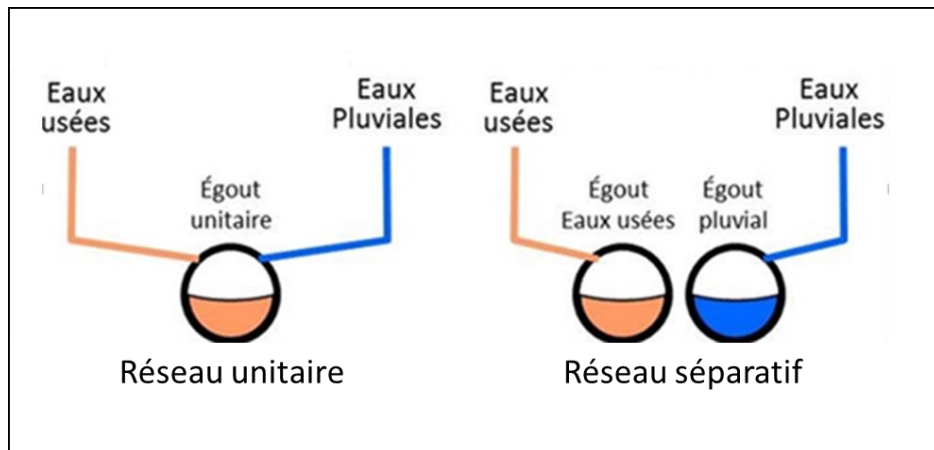


Figure 2 : Réseaux (unitaire et séparatif) de collecte des eaux usées

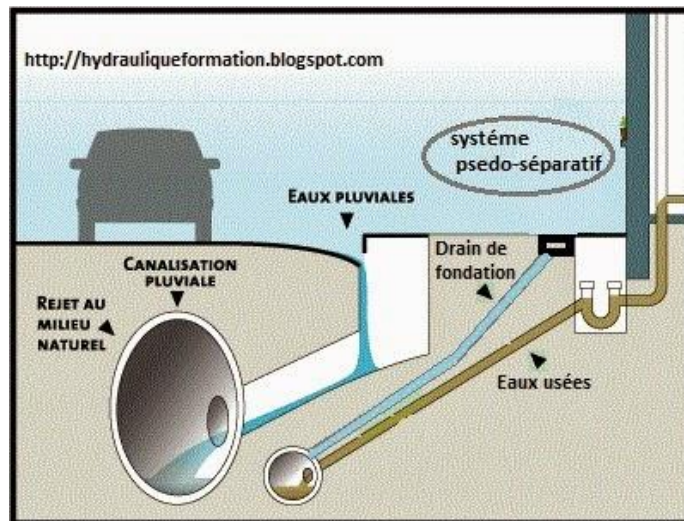


Figure 3 : Système de collecte pseudo-séparatif [9]

Chapitre II : Traitement des eaux usées

II- Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux résiduaires vise à réduire la charge polluante (matières organiques et minérales) contenue dans ces eaux avant de les rejeter dans le milieu naturel ou de les réutiliser [10].

Il existe deux types d'assainissement des eaux usées :

- ✓ Assainissement collectif : Il s'agit d'un système communal de traitement des eaux usées auquel sont raccordées les habitations d'une agglomération urbaine. Les eaux usées sont collectées puis transportées via un réseau de canalisations vers une station d'épuration qui se chargera de la dépollution. Ce type d'assainissement concerne principalement les zones d'habitat dense.
- ✓ Assainissement non collectif (ou individuel ou autonome) : Il concerne les habitations non raccordées à un réseau public de collecte des eaux usées [11]. Les installations d'assainissement autonome sont constituées d'un dispositif de prétraitement ainsi que d'un dispositif de traitement qui utilise le pouvoir auto-épurateur du sol. Ce type d'assainissement concerne principalement les zones d'habitat dispersé. D'après Schriver-Mazzuoli [12], un assainissement autonome non collectif doit obligatoirement comporter une fosse toutes eaux ou une fosse septique (Figure 4), un système de ventilation de la fosse et un champ d'épandage.

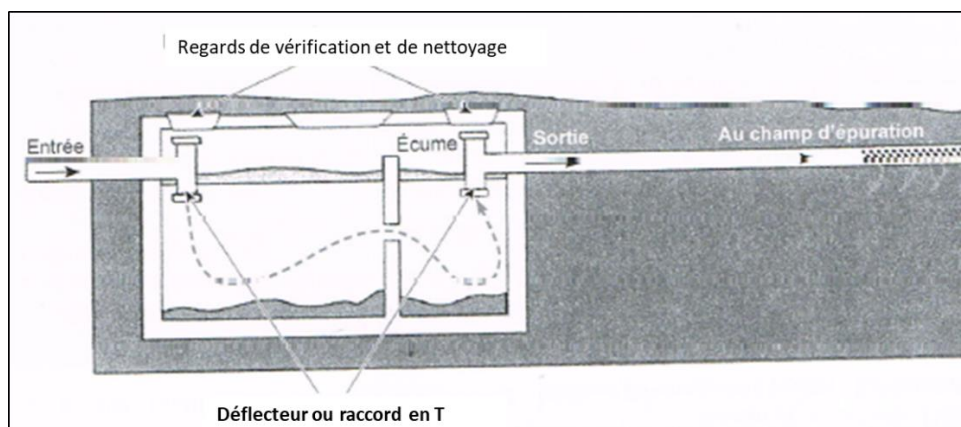


Figure 4 : Schéma d'une fosse septique [12]

II-1- Les différentes phases de traitement des eaux usées au sein d'une station d'épuration

Les eaux résiduaires sont acheminées vers une station d'épuration grâce à des réseaux de collecte unitaires ou séparatifs où elles subissent une succession de phases de traitement

faisant appel à des traitements physiques, physico-chimiques et biologiques [13]. En effet, la filière classique d'assainissement des eaux usées comporte différentes étapes successives de traitement : les prétraitements, le traitement primaire, le traitement secondaire souvent biologique et le traitement tertiaire (Fig. 5).

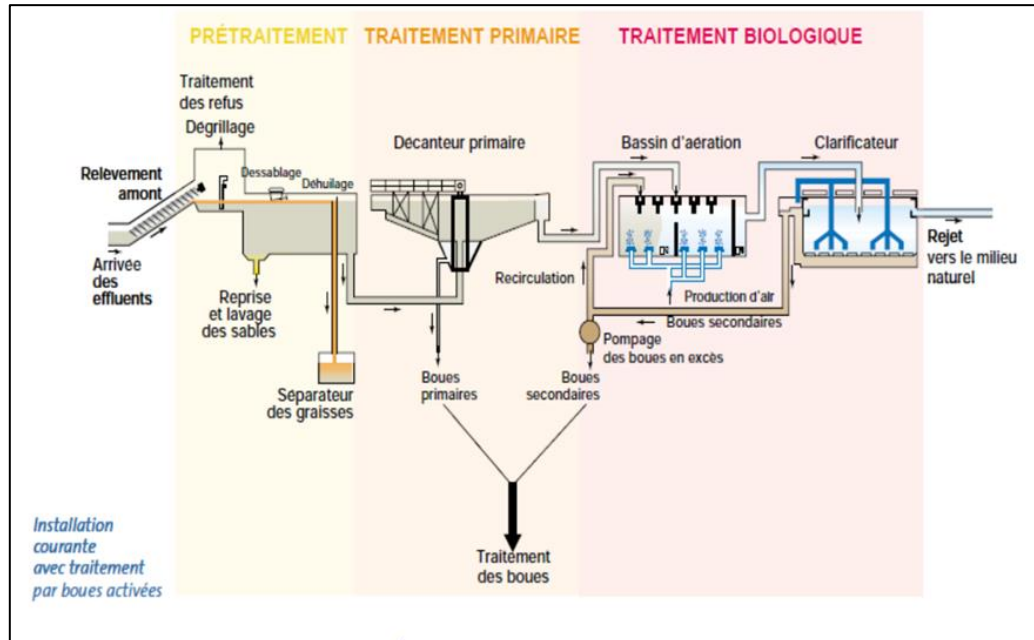


Figure 5 : Représentation schématique d'une station d'épuration [14]

II-1-1- Les prétraitements

Les prétraitements consistent en une étape physique visant à éliminer les déchets grossiers, les sables, les huiles et les graisses présents dans l'effluent brut. Ils servent principalement à protéger les ouvrages. Ils se situent en tête de station d'épuration et consistent en un dégrillage, un dessablage, un déshuilage/dégraissage [15].

II-1-1-1- Le dégrillage

C'est la première étape de prétraitement. Il consiste à arrêter les déchets solides volumineux. L'efficacité du dégrillage dépend de l'espace inter-barreaux des dégrilleurs utilisés. Il existe trois principaux types de dégrillage selon l'espacement des barreaux : le pré-dégrillage avec un espacement entre 30 à 100 mm, le dégrillage moyen dont les barreaux sont espacés de 10 à 30 mm et le dégrillage fin avec des barreaux espacés de moins de 10 mm (Photo 1).



Photo 1 : Dégrilleur manuel à grille oblique

II-1-1-2- Dessablage, déshuilage, dégraisage

Le dessablage consiste à extraire de l'effluent les sables et les graviers généralement par pompage ou par un dispositif d'insufflation d'air [12]. Il s'agit d'une opération de décantation. Il existe plusieurs types de dessableurs : Dessableurs couloirs, rectangulaires et circulaires.

Le dégraisage/déshuilage a pour but d'extraire de l'eau les graisses et les huiles afin d'éviter toute perturbation du fonctionnement des ouvrages de traitement. Ces matières, ayant une densité inférieure à 1, flottent à la surface du dégraisseur où elles sont raclées.

L'élimination des sables et des graisses peut être réalisée dans un même ouvrage, grâce à la différence de densité entre ces composés [15].

Deux types de dégraisseurs sont employés : dégraisseurs statiques et dégraisseurs aérés. Le dessablage et le dégraisage sont couramment associés dans un même ouvrage [12] : Dessableur/dégraisseur combiné (Fig. 6).

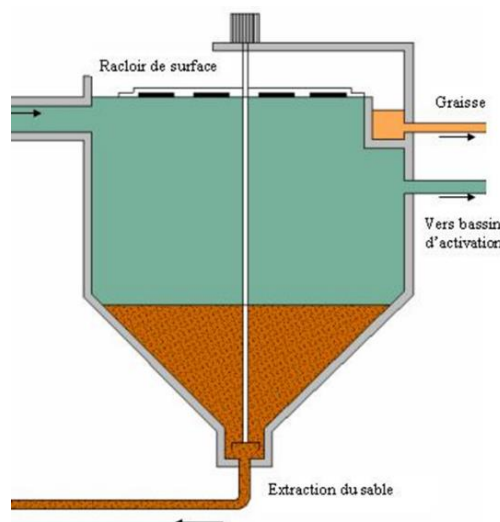


Figure 6 : Dessableur – Dégraisseur [Source : Physique Chimie Hourdequin]

II-1-2- Traitement primaire

Le traitement primaire est une étape qui vise à compléter les prétraitements. Il s'agit de récupérer par décantation les particules fines en suspension en les faisant passer un décanteur. Cette opération de séparation permet d'arrêter 50 à 70% des matières en suspension (MES) présentes dans l'effluent à traiter. Les matières en suspension s'accumulent au fond du bassin de décantation où elles sont régulièrement extraites [15].

Il existe plusieurs types de décanteurs. Les plus utilisés sont : décanteurs statiques à flux vertical (Photo 2, Fig. 7.), décanteurs à flux horizontal (Photo 3) et décanteurs lamellaires (Photo 4). Le choix du type de décanteur est fonction des caractéristiques des particules à éliminer.

La décantation est plus efficace lorsqu'elle est précédée d'une floculation. Dans le cas d'une décantation statique, la vitesse limite (V_p) de décantation d'une particule peut être calculée en utilisant la formule suivante [12] :

$$V_p = g. (\rho_p - \rho_l). d^2 / 18\eta \quad (1)$$

avec:

- ρ_p : masse volumique de la particule
- ρ_l : masse volumique du liquide
- d : diamètre apparent de la particule
- η : viscosité dynamique de l'eau
- g : accélération de la pesanteur

Dans un décanteur idéal, une particule est éliminée lorsqu'elle atteint la zone de boues. L'amélioration de la décantation passe par une évacuation du dépôt de boues plus rapide [15].

Pour qu'une particule se décante dans le décanteur, il faut que sa vitesse de décantation soit supérieure à la vitesse de Hazen (V_H) ou charge hydraulique superficielle (Fig. 8).

$$V_H = Q/S \quad (2)$$

Avec Q : le débit de l'eau et S : la surface du décanteur.

Dans le cas de la décantation lamellaire, la vitesse de sédimentation limite d'une particule peut être calculée à partir de l'équation suivante [16] :

$$V_p = Q/nS_L \cos\alpha \quad (3)$$

Avec :

Q : débit de l'eau

n : nombre de lamelles

S_L : surface élémentaire de lamelle

α : angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale

L'évacuation des boues accumulées au fond du décanteur se fait grâce à un racloir. (Figure 9).



Photo 2 : Décanteur à flux vertical [Source : www.cc-pmf.fr]

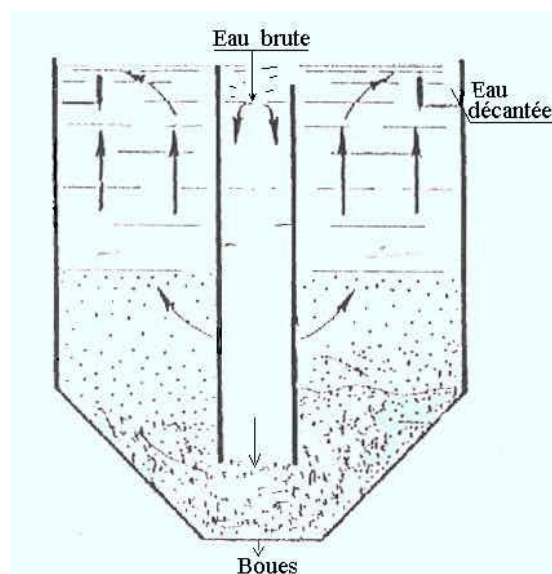


Figure 7 : Schéma simplifié d'un décanteur à flux vertical [Source : paraverini.free.fr]

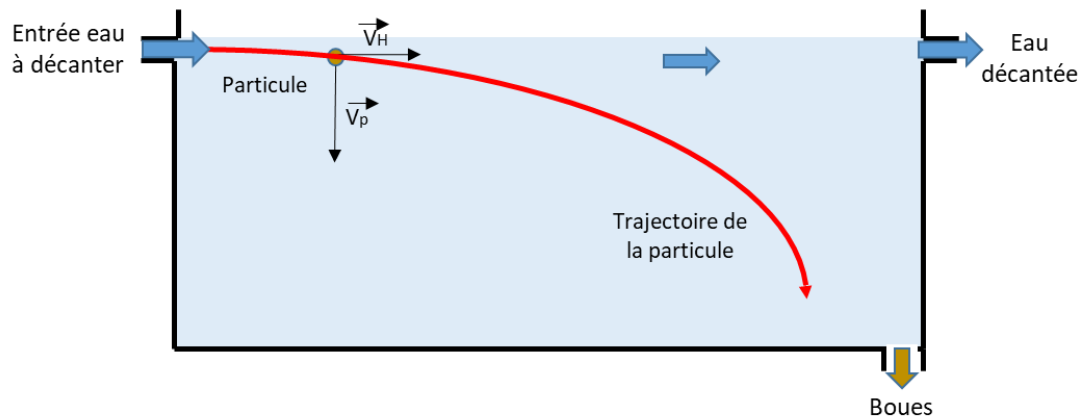


Figure 8 : Schéma simplifié du principe de la décantation

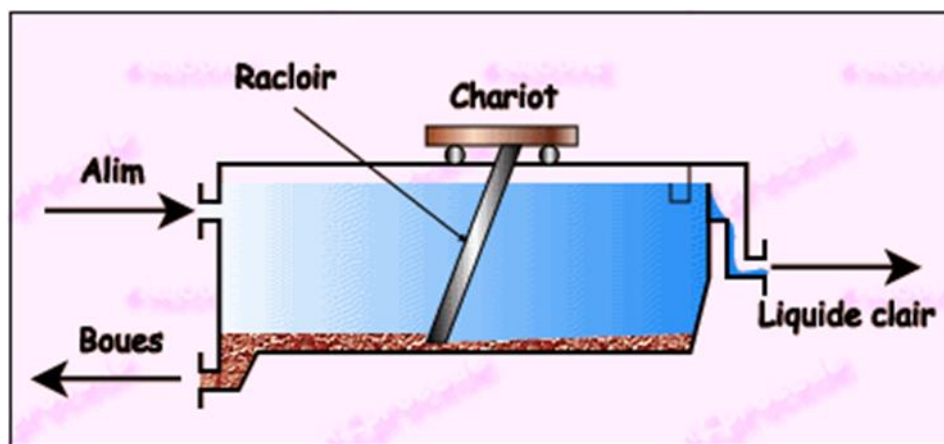


Figure 9 : Décanteur rectangulaire à racloir [Source : AZprocede.fr]

Un décanteur lamellaire, grâce à la série des lamelles parallèles (Fig. 10), permet de multiplier la surface de décantation utile tout en réduisant la surface au sol par rapport à un bassin de décantation classique à flux horizontal [16]. Il accélère le processus de dépôt des particules [13].

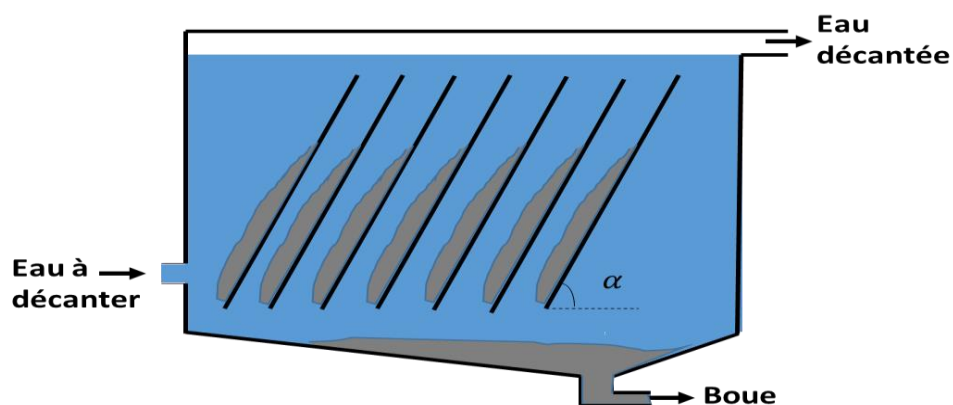


Figure 10 : Décanteur lamellaire



Photo 3 : Décanteur à flux horizontal [Source : Hellopro]



Photo 4 : Décanteur lamellaire [Source : Cours géologie.com]

II-1-3- Traitement secondaire : Epuration biologique

II-1-3-1- Introduction

Le traitement secondaire est le niveau minimal de traitement qui doit être mis en œuvre au sein des stations d'épuration [13].

L'eau traitée par des procédés physico-chimiques est débarrassée des polluants insolubles mais contient des impuretés solubles qu'il faut éliminer. Ces impuretés sont essentiellement des matières organiques biodégradables.

L'élimination de ces polluants organiques est la tâche de procédés d'épuration biologiques. En effet, il s'agit d'un véritable transfert d'une forme non accessible (matières dissoutes ou finement colloïdales) en une forme manipulable (suspension de microorganismes). Le traitement biologique est une phase essentielle dans une STEP [18].

Les traitements biologiques reposent sur la dégradation de la matière organique présente dans les eaux usées par une biomasse épuratrice [19].

Les procédés biologiques de traitement des eaux résiduaires reproduisent le processus d'autoépuration qui existe spontanément dans les milieux naturels. Ces procédés d'épuration utilisent l'activité des microorganismes afin de dégrader la charge polluante présente dans les eaux usées.

Les micro-organismes responsables de l'épuration s'agglomèrent sous forme de flocs et se développent en utilisant la pollution comme substrat nécessaire à la production d'énergie vitale et à la synthèse de nouvelles cellules vivantes (Fig. 11). Une partie des éléments polluants qui n'est pas dégradée biologiquement peut être adsorbée et incorporée aux flocs de boues. L'épuration biologique consiste à provoquer, en présence ou non d'oxygène, une prolifération microbienne plus ou moins contrôlée. Les procédés biologiques aérobies (boues activées, lits bactériens, disques biologiques, biofiltres, lagunage aéré...) existent pratiquement dans toutes les stations d'épuration. Cependant, les procédés biologiques anaérobies sont consacrés aux effluents industriels hautement chargés en matière organique.

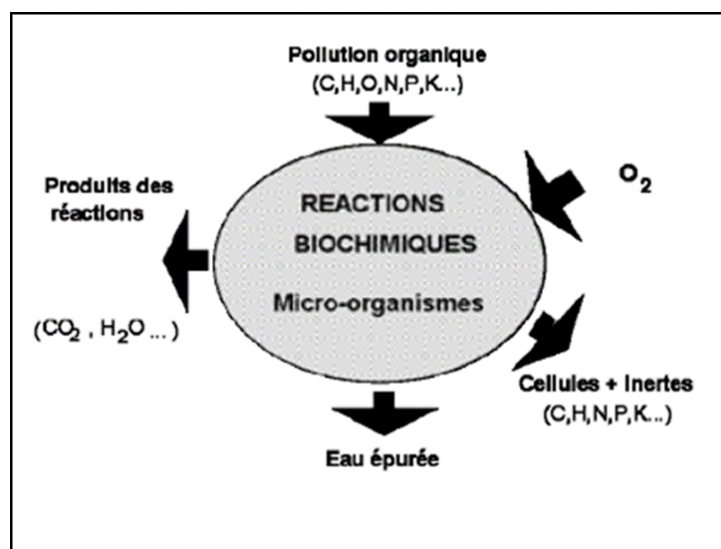


Figure 11 : Principe de l'épuration biologique aérobie [10]

Le processus de la biodégradation se déroule comme suit : Une phase de transport permet d'amener les polluants (solubles et insolubles) au sein du liquide à la surface de la bactérie (Fig. 12). Le substrat soluble diffuse facilement à travers la membrane, alors que les matières insolubles (particules, colloïdes et grosses molécules) sont, après leur adsorption à la surface de la bactérie, hydrolysées par des exo-enzymes avant d'être à leurs tours

facilement assimilables. C'est au sein de la cellule que s'effectue la métabolisation des polluants.

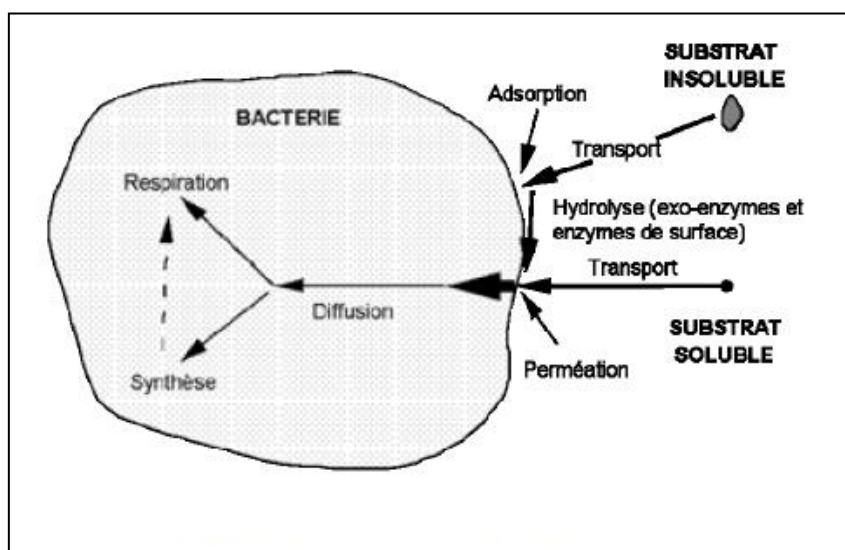


Figure 12 : Schéma de principe de la nutrition bactérienne [10]

En se basant sur la valeur du rapport DCO/DBO₅, on peut juger les chances de réussite de l'épuration des eaux usées. Ainsi, on peut classer les eaux résiduaires en fonction de ce rapport :

- si **DCO/DBO₅ < 1,66** : Eaux usées susceptibles d'être facilement traitées biologiquement ;
- si **1,66 < DCO/DBO₅ < 2,5** : Eaux usées susceptibles de subir un traitement biologique ;
- si **2,5 < DCO/DBO₅ < 5** : Eaux usées non susceptibles de subir un traitement biologique.

Parmi les principaux procédés biologiques mis en œuvre dans les stations d'épuration, on peut citer : procédé à boues activées, lits bactériens, disques biologiques et biofiltres.

II-1-3-2- Procédé à boues activées

a- Principe

Le principe du procédé à boues activées consiste à mettre en contact les composés polluants contenus dans l'eau à traiter avec une biomasse maintenue en suspension et aérée dans un bassin d'aération (ou bassin d'activation) (Photo 5).

La recirculation et l'extraction des boues biologiques, à partir du fond du clarificateur (ou décanteur secondaire) maintiennent une biomasse constante dans les bassins. Le couple aération-brassage permet de maintenir l'aérobie lors de la biodégradation.



Photo 5 : Bassin d'aération

b- Schéma type d'installation à boues activées

Le bassin d'aération reçoit l'eau prétraitée. La biomasse adsorbe et élimine une partie plus ou moins importante de la pollution, en fonction du temps de séjour et de la charge de la station (Fig. 13). Le clarificateur a pour fonction de séparer l'eau traitée de la boue biologique normalement décantable.

L'aération est assurée par turbines, insufflation d'air, ou par ponts brosses dans le cas des chenaux d'oxydation.

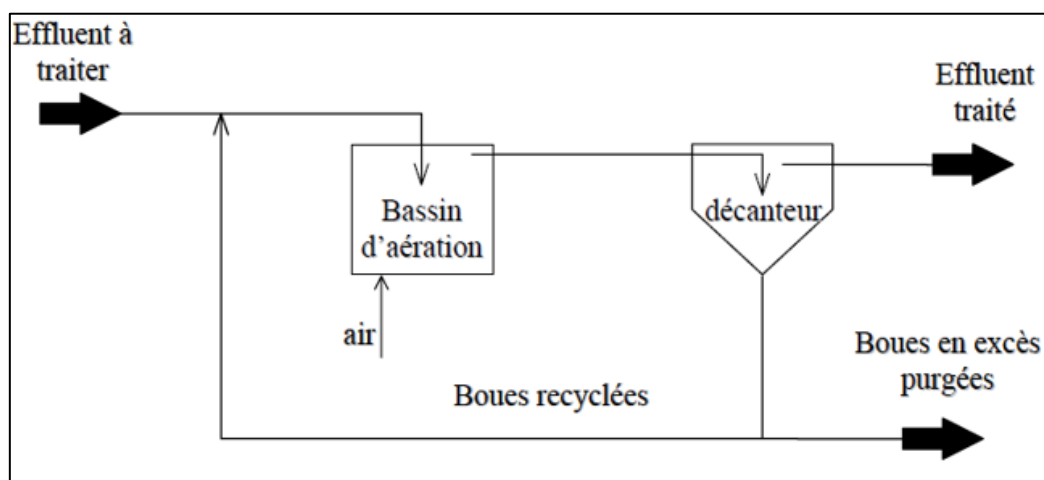


Figure 13 : Schéma type d'une installation à boues activées [12]

c- Notion de charge

La charge représente la quantité de pollution mesurée en DBO₅ arrivant par jour à l'installation, ramenée soit au volume du bassin d'aération, soit à la quantité de biomasse mesurée en MVS (matières volatiles en suspension). La charge volumique traduit le rapport entre la masse journalière de substrat biodégradable apportée par l'effluent brut et le volume du bassin épurateur. La charge massique représente le flux de DBO₅ entrant rapportée à la biomasse présente dans le bassin d'aération (Tableau 1). La quantité de microorganismes du clarificateur peut y être associée. On considère alors l'étage biologique constitué du bassin d'aération et du clarificateur.

Tableau 1 : Expression des charges volumiques et massiques [15]

Charge volumique	C_v en kg de DBO ₅ . J ⁻¹ . m ⁻³	$Q [DBO_5]/V_{BA}$	
Charge massique	C_m en kg de DBO ₅ . J ⁻¹ . Kg ⁻¹	$Q [DBO_5]/V_{BA}[MVS]_{BA}$	$Q [DBO_5]/(V_{BA}+0,75V_{CL}) [MVS]_{BA}$

avec:

- Q: Débit d'eau brute journalier en m³/j.
- [DBO₅] : Concentration moyenne de l'effluent brut en Kg/m³.
- V_{BA} et V_{CL} : Volume du bassin d'aération et du clarificateur en m³.
- [MVS]_{BA} : Concentration des boues dans le bassin d'aération en kg/m³.

Les valeurs de C_v et C_m définissent le type de charge des stations d'épuration. Une installation présentant un faible volume de bassin et recevant beaucoup de pollution est une station à forte charge.

Elle est à faible charge dans le cas contraire (Tableau 2).

Tableau 2 : Type de charge d'une station [15]

Type de charge	C _m	C _v
Forte charge	0,4 à 1	1,5
Moyenne charge	0,15 à 0,35	0,5 à 1,5
Faible charge	0,1	0,3
Aération prolongée	0,07	0,25

Les rendements épuratoires dépendent de la charge massique de l'installation.

Le volume de bassin d'aération (V_{BA}) définit une notion temporelle. Le temps de séjour de l'eau dans le bassin, T_s est déterminé par l'expression suivante :

$$T_s = V_{BA} / Q \text{ (en h)} \quad (3)$$

d- Boues biologiques

• Production

L'évaluation de la production de boues est indispensable pour dimensionner la filière boue. L'accumulation des MES non biodégradables et l'accroissement de la biomasse épuratrice sont les deux phénomènes de la production de boues.

Plusieurs modèles d'évaluation de la production de boues ont été développés (Tableau 3).

Les valeurs des coefficients a_m et b dépendent de la charge massique de la station d'épuration (Tableau 4).

Tableau 3 : Formules de la production de boue biologique [15]

Auteur-Constructeur	Production de boues en kg MS j ⁻¹	Paramètres
Eckenfelder	$S_{min} + S_{dur} + a_m L_e - b S_v - S_{eff}$	a_m : biomasse produite par kg DBO ₅ b : fraction de biomasse détruite par jour
Constructeur	$k \cdot L_e$	k compris entre 0,8 et 1,1
Constructeur	$S_{min} + S_{dur} + 0,25 a_m L_e - S_{eff}$	-
AGHTM	$S_{min} + S_{dur} + (0,83 + 0,2 \log C_m) L_e - S_{eff}$	C_m : charge massique de la station

Avec :

- S_{min} : masse de matières minérales en suspension de l'eau brute évaluée à 30% des MES.
- S_{dur} : masse de matières en suspension difficilement biodégradables évaluée à 17,5% des MES.
- L_e : masse de DBO₅ éliminée par jour.
- S_v : masse de boues organiques dans le bassin d'aération en kg de MVS.
- S_{eff} : masse de boues évacuées avec l'effluent traité en kg de MES par jour.

Tableau 4. Valeurs des coefficients a_m et b en fonction de la charge massique [15]

Valeurs de C_m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Valeurs de b	0,065	0,07	0,07	0,07	0,07
Valeurs de a_m	0,66	0,59	0,56	0,53	0,5

- Recirculation – Extraction

La quantité de biomasse doit rester constante dans le bassin d'aération. Les boues biologiques décantent dans le clarificateur. Pour éviter toute fermentation dans cet ouvrage non aéré et maintenir une biomasse stable, il faut les recirculer à partir du décanteur secondaire vers le bassin.

Le débit de recirculation R , varie en fonction du débit d'eau brute Q , de la concentration des boues dans le bassin d'aération C_{BA} et des boues recirculées C_R .

Pour des valeurs de MES de l'eau clarifiée inférieures à 30mg/L, et pour une boue décantant correctement, on peut utiliser les expressions illustrées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Expression des paramètres concernant la boue [15]

IM	IB	Recirculation	Extraction	Age de boue
$\frac{V_{30}}{MS}$	$\frac{V_{30} \text{ corrigé}}{MS}$	$\frac{R}{Q} = C_{BA}/C_R - C_{BA}$	$V_{BA} \frac{C_{BA} - C_{BA \text{ nominale}}}{C_R}$	$\frac{S_t}{E}$

L'aptitude de la boue à la décantabilité peut être appréciée à l'aide de l'indice de Mohlman (IM). Il s'agit de volume occupé par un gramme de boues après 30 minutes de décantation. Avec des concentrations supérieures à 3g/L, cet indice ne peut pas être utilisé. On utilise un autre indice appelé indice de boues IB qui est déterminé après une dilution [15].

L'âge des boues représente leur temps de séjour dans l'étage biologique. C'est le rapport entre la quantité de boue dans l'étage biologique, S_t et la quantité soutirée quotidiennement, E .

L'excès de boue se retrouve dans l'étage biologique. Il faut l'extraire à partir du clarificateur. Le volume à extraire s'évalue à partir de la concentration nominale en MES (Tableau 5).

e- Aération-brassage

Les besoins en O_2 dépendent de la quantité de pollution carbonée et azotée à éliminer quotidiennement et de la consommation de la biomasse.

Les besoins horaires de pointe sont calculés en considérant les fluctuations des flux de DBO_5 et d'azote à nitrifier en fonction de l'heure de la journée. Plusieurs paramètres déterminent les performances des aérateurs (Tableau 6).

Les systèmes d'aération peuvent être classés en trois catégories :

- les aérateurs de surface comme les turbines et les brosses (Photos 6 et 7) ;
- Les systèmes à diffusion d'air (Photo 8) ;
- les procédés à base de pompe.

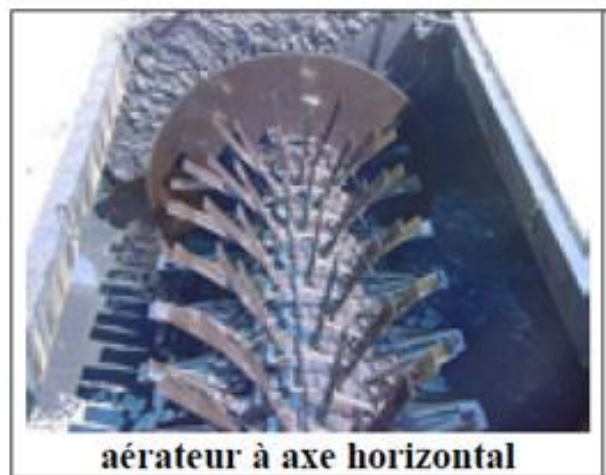


Photo 6 : Aérateur de surface à axe horizontal (Brosses)



Photo 7 : Aérateur à turbine Photo 8 : Aérateur par diffusion d'air

Le brassage assure la mise en contact de la pollution avec les floccs bactériens et les bulles d'air. Il permet la reprise des dépôts accumulés pendant les périodes d'arrêt de l'aération.

Tableau 6 : Différents paramètres de l'aération [15]

Paramètre	Abréviation - Unité	Formule	Définition
Capacité d'oxygénation	C.O $\text{kg O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$	-	Masse d' O_2 introduite par heure et par m^3 de bassin
Apport horaire	A.H $\text{kg O}_2 \text{ h}^{-1}$	$\text{CO} \cdot V_{\text{BA}}$	Masse d' O_2 introduite dans le bassin en une heure
Apport spécifique brut	ASB $\text{kg O}_2 \text{ kWh}^{-1}$	$\text{CO} \cdot V_{\text{BA}}/E$	Masse d' O_2 introduite pour 1 kWh d'énergie

Avec :

- V_{BA} : Volume du bassin d'aération.
- E : Energie consommée.

f- La clarification

Le clarificateur ou décanteur secondaire (Photo 9) est situé en aval du traitement biologique. Cet ouvrage assure la séparation de l'eau épurée de la biomasse floculée.

La vitesse ascensionnelle V, ou charge hydraulique superficielle, définie par le rapport Q_p/S (avec Q_p : débit de pointe et S : la surface du plan d'eau) est le premier paramètre à considérer lors du dimensionnement d'un clarificateur.



Photo 9 : Clarificateur [Source : MAS-BTP]

II-1-3-3- Lits bactériens

L'effluent contenant la pollution ruisselle sur le support et pénètre dans le biofilm alors que l'air chemine naturellement à travers le lit.

La hauteur du lit bactérien (Fig. 14) est de 1 à 3 m pour un garnissage classique et de 6 à 12 m pour des garnissages plastiques.

L'effluent prétraité est réparti à la surface du lit par un tourniquet d'aspersion (Sprinkler) (Photo 10). Après percolation à travers le matériau de garnissage, les eaux traitées sont récupérées à la base de l'ouvrage (Fig. 15). Ce type de procédé permet d'éliminer 80% de la DBO.

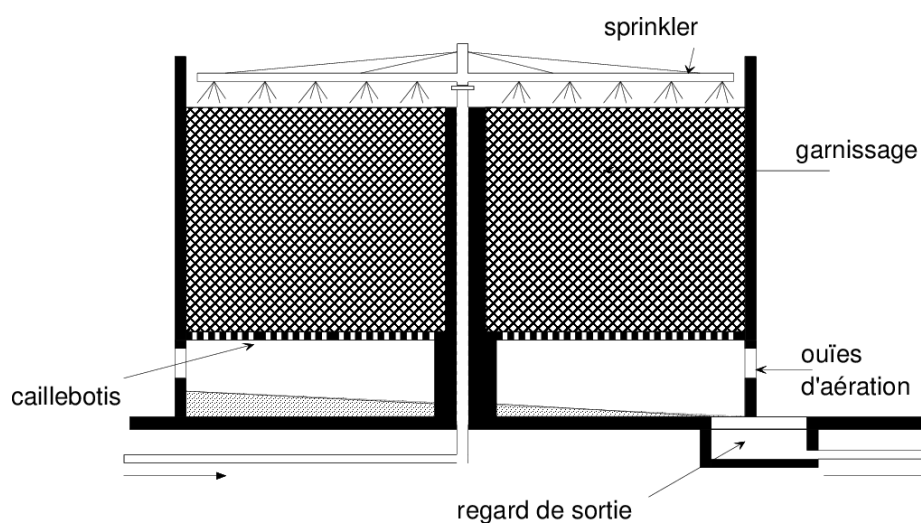


Figure 14 : Schéma d'un lit bactérien en coupe verticale [22]



Photo 10 : Sprinkler [Source : Siden.lu]

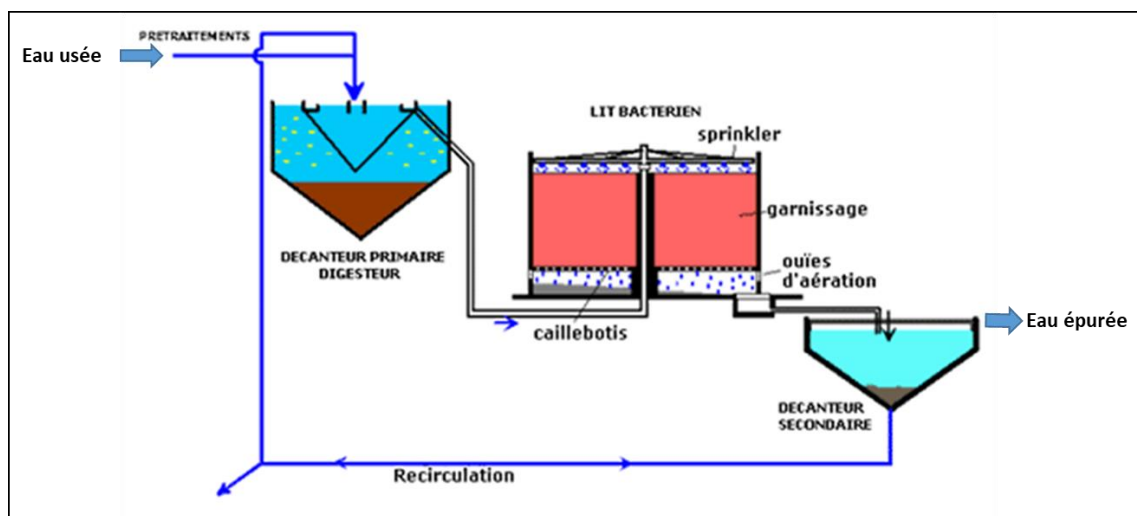


Figure 15 : Schéma type d'une station d'épuration à lit bactérien [10]

II-1-3-4- Lits immergés

L'eau usée, préalablement prétraitée, alimente un bioréacteur contenant de matériau poreux inerte en plastique immergé dans l'eau et servant de support à des micro-organismes épurateurs (Photo 11).

L'eau à épurer circule à l'intérieur de cette masse perméable, où les bactéries peuvent alors extraire la pollution en l'utilisant comme nourriture. La respiration des bactéries est assurée par une rampe d'aération aménagée en-dessous du matériau à lit immergé (Fig. 16).



Photo 11 : Lit immergé [Source : Siden.lu]

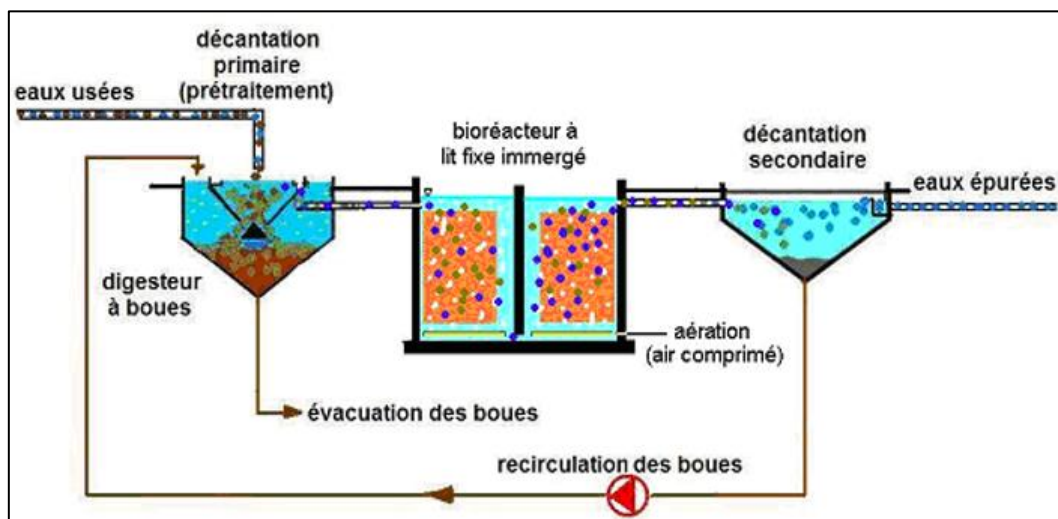


Figure 16 : Schéma type d'une station d'épuration à lit immergé [fsnv.univ-bba.dz]

II-1-3-5- Disques biologiques

Les disques biologiques sont des réacteurs comportant un ensemble de disques en matière plastique inerte plus ou moins immergés (40 à 60%) dans un réservoir à flux contenu, tournant à vitesse moyenne d'environ un tour par minute et sur lesquels s'est développée une biomasse active capable de dégrader la pollution véhiculée par l'effluent à traiter.

Lors de l'émersion de l'ensemble de disques dans le réservoir, les bactéries fixées prennent de l'air atmosphérique l'oxygène indispensable à leur métabolisme et lors de l'immersion, elles consomment le substrat dissous dans l'eau (Fig. 17). Dès que le biofilm

dépasse une certaine épaisseur, il se détache de façon autonome et est entraîné vers le décanteur secondaire (clarificateur) où il est séparé de l'eau traitée.

Les installations à disques biologiques (Fig. 18) sont utilisées essentiellement pour favoriser la nitrification mais aussi pour la dénitrification grâce à une immersion totale des disques.

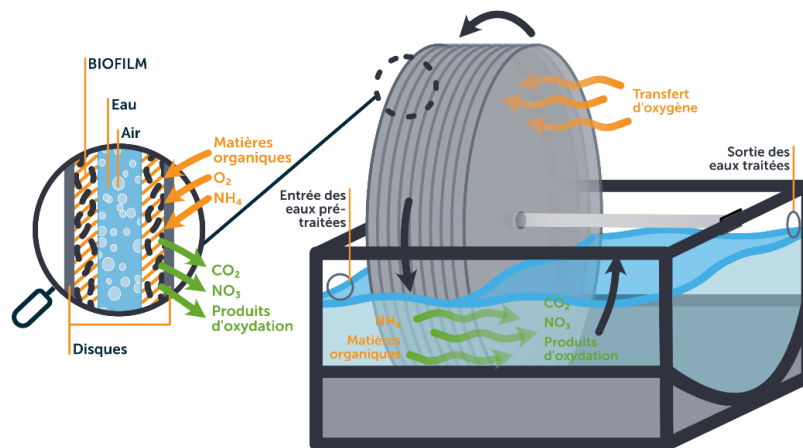


Figure 17 : Principe du fonctionnement des disques biologiques [Biorotor]

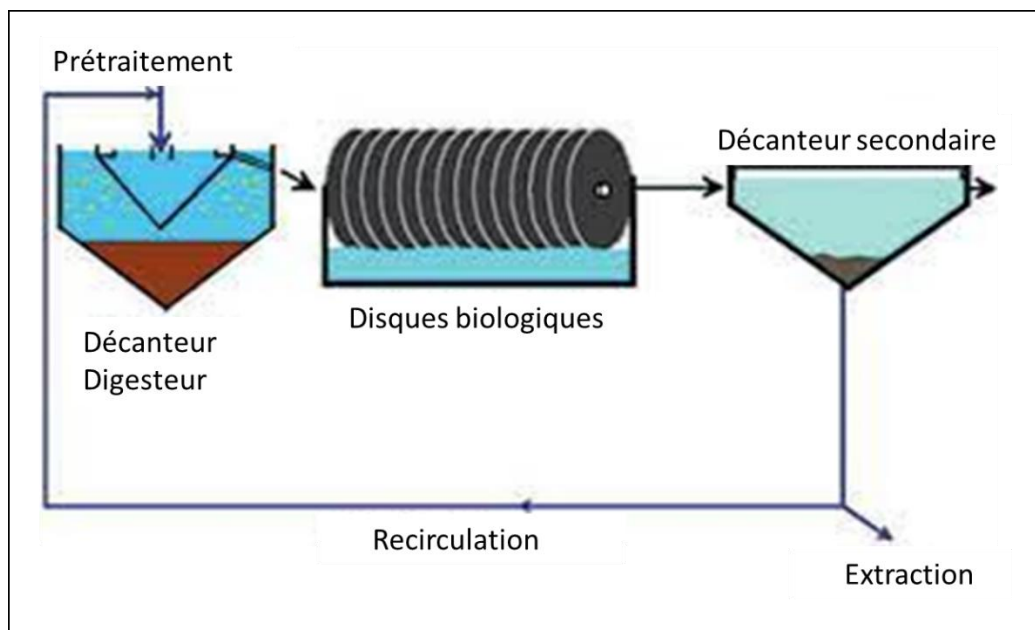


Figure 18 : Coupe schématique d'une installation à disques biologiques [10]

II-1-3-6- Biofiltres

Le principe des biofiltres consiste à faire passer les eaux résiduaires à travers une cuve contenant un matériau filtrant immergé constituant le support de fixation de biofilm

(Fig. 19). L'effluent est débarrassé en même temps des particules en suspension et des polluants dissous grâce à des mécanismes physico-chimiques et biologiques.

Les besoins en oxygène des microorganismes sont assurés par insufflation d'air (air procédé).

Afin de résorber le colmatage et d'éliminer les boues biologiques en excès, le biofiltre doit être lavé régulièrement à l'eau traitée (eau de lavage) et l'air (air de lavage).

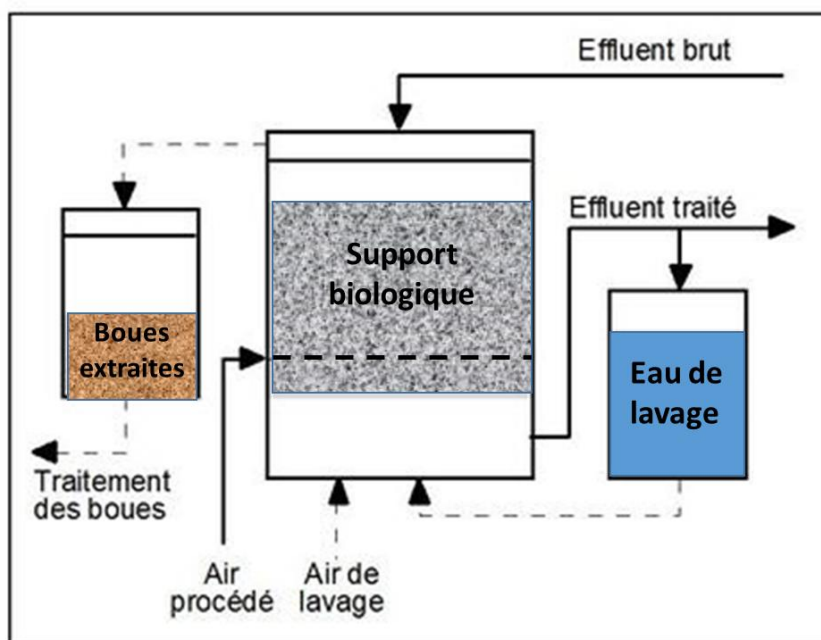


Figure 19 : Principe du fonctionnement d'un biofiltre [Source : Wikhydro]

II-1-4- Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire, souvent qualifié de traitement avancé, intervient généralement après un traitement biologique suivi d'une étape de séparation « solide-liquide ». Ce procédé peut prendre diverses formes, telles que la déphosphatation, la désinfection, la réduction de l'azote ammoniacal ou encore la diminution de l'azote total. Il peut intégrer des processus physiques, tels que la filtration ou la décantation, chimiques, comme l'ajout de réactifs, ou biologiques, en mobilisant une biomasse épuratrice. Le choix de ce traitement complémentaire dépend des objectifs spécifiques fixés pour l'installation [23]. Le traitement tertiaire vient en complément des chaînes classiques d'épuration. Dans certains cas, il s'avère indispensable notamment lorsque l'eau traitée est destinée à être rejetée dans un milieu aquatique sensible au phénomène d'eutrophisation ou dans un milieu à usage balnéaire (zones d'activités nautiques ou touristiques...). L'affinage peut

être nécessaire lorsque l'eau épurée fait l'objet d'une réutilisation à des fins agricoles, urbaines, domestiques ou industrielles.

Une désinfection est indispensable lorsque l'eau traitée est destinée à être rejetée en zone de baignade, de pisciculture ou d'élevage de coquillage. Cette opération s'avère nécessaire lorsque l'eau épurée est réutilisée à des fins domestiques.

La désinfection de l'eau peut être favorisée par différents moyens comme la chloration, l'application du rayonnement ultra-violet et l'ozonation.

Chapitre III : Procédés anaérobies de traitement des eaux usées

III- Procédés anaérobies de traitement des eaux usées

Les eaux usées fortement chargées de matière organique font souvent l'objet d'un traitement anaérobie. L'objectif essentiel de ce type de traitement est la valorisation énergétique.

La dégradation de la matière organique en l'absence totale d'oxygène est assurée par des bactéries anaérobies. Parmi les procédés anaérobies mis en œuvre dans les stations d'épuration on cite la méthanisation.

La méthanisation, également appelée digestion anaérobie, est un processus biologique naturel qui, en l'absence d'oxygène, convertit un substrat complexe composé de molécules organiques lourdes, souvent insolubles, en méthane (biogaz) [24].

La méthanisation comprend quatre processus anaérobies (Fig. 20) :

- L'hydrolyse : Les bactéries hydrolytiques hydrolysent les substrats organiques, tels que les polysaccharides, les protéines et les lipides, en oligoéléments ou monomères (monosaccharides, acides gras, acides aminés) grâce à des enzymes extracellulaires qu'elles sécrètent, telles que les protéases, les lipases et les cellulases. Ce processus permet de rendre la matière organique bio-disponible pour son assimilation dans le métabolisme microbien [24] ;
- L'acidogénèse : Lors de cette phase, les matières organiques solubles issues de l'hydrolyse sont transformées en acides gras volatils (AGV) tels que l'acétate, le propionate, le butyrate et l'isobutyrate, ainsi qu'en alcools, en acides organiques autres que les AGV, en hydrogène et en dioxyde de carbone [24].
- L'acétogénèse : processus qui transforme les produits de la phase précédente en acétate, en hydrogène et dioxyde de carbone grâce à l'action des bactéries acétogènes.
- La méthanisation : Cette étape, correspondant à la phase finale de la méthanisation, aboutit à la production de méthane grâce à l'action de deux groupes de bactéries méthanogènes : les bactéries acétotrophes et les bactéries hydrogénotrophes. Ces deux groupes empruntent des voies distinctes pour produire le méthane [24]. En effet, les bactéries acétotrophes réduisent l'acétate en méthane (Réaction 1) alors que les bactéries hydrogénotrophes réduisent le dioxyde de carbone en méthane (Réaction 2) :

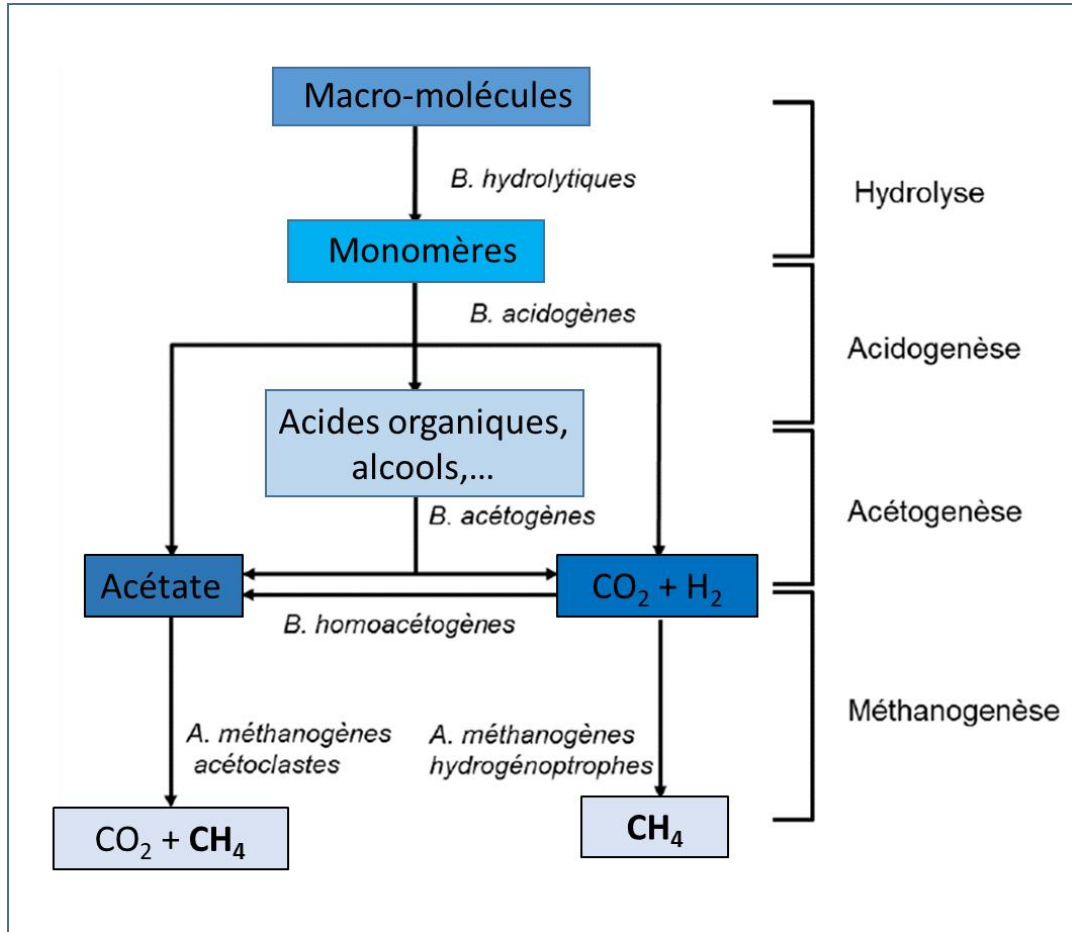


Figure 20 : Différentes phases de méthanisation [Source : Techno-Science.net]

Chapitre IV : Filières extensives d'épuration des eaux usées

V- Filières extensives d'épuration des eaux usées

Les techniques extensives de traitement des eaux usées urbaines sont exclusivement appliquées dans le cas des collectivités rurales généralement inférieures à 500 équivalents habitants.

On distingue des procédés extensifs à cultures fixées comme l'infiltration-percolation et les filtres plantés de roseaux et des procédés à cultures libres comme le lagunage.

IV-1- L'infiltration-percolation

L'infiltration-percolation est une technique d'épuration biologique à biomasse fixée sur un support granulaire fin. Elle consiste à infiltrer les eaux usées ayant subi un traitement primaire ou secondaire dans des bassins de faible profondeur, creusés dans le sol en place ou remplis de massifs sableux rapportés. L'infiltration-percolation reproduit l'effet auto-épurateur du sol.

Les eaux usées prétraitées sont déversées et réparties sur un massif de sable, à l'air libre (Fig. 21 et 22). En percolant au travers de ce massif, elles sont d'abord débarrassées des matières en suspension par filtration superficielle, puis leur matière organique est dégradée et leurs composés azotés sont oxydés par les bactéries fixées qui se développent au sein du massif [25].

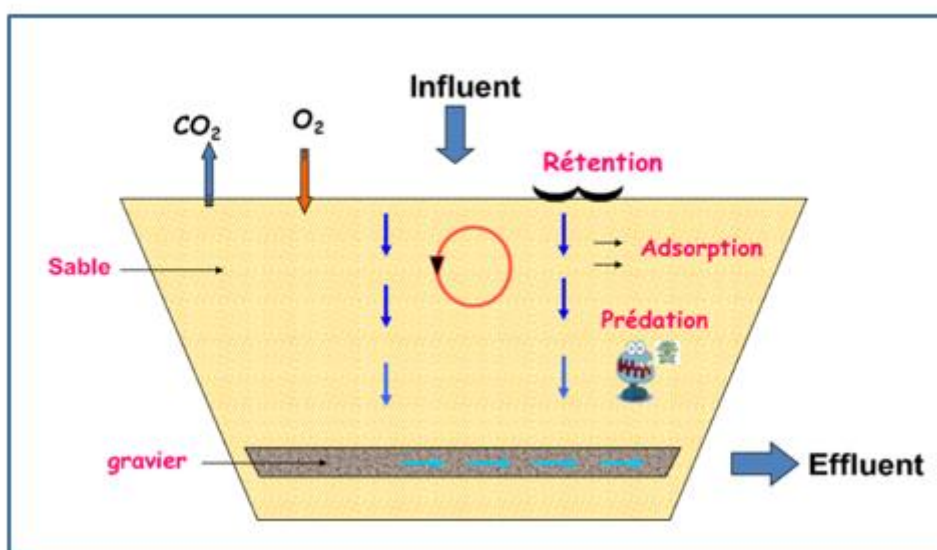


Figure 21 : Schéma simplifié du principe de fonctionnement de l'infiltration-percolation

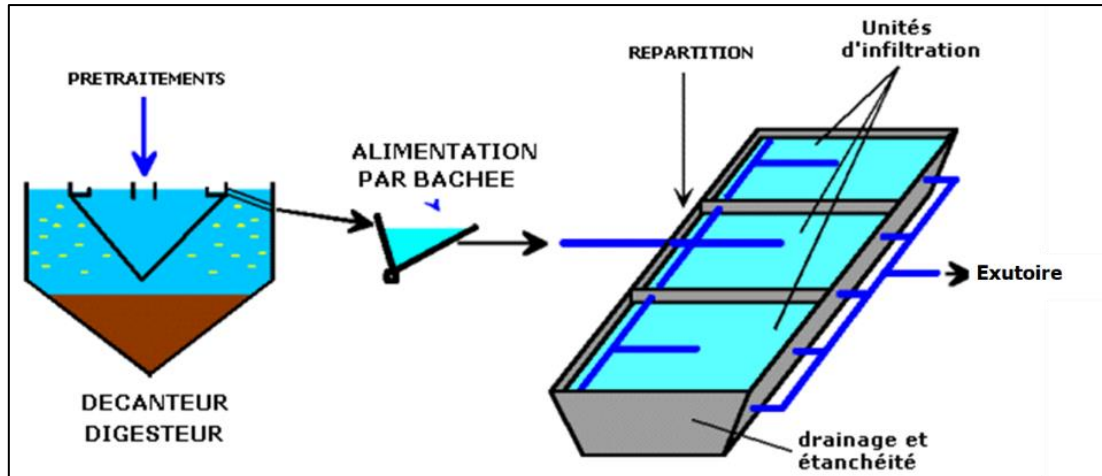


Figure 22 : Schéma type d'une installation à procédé d'infiltration-percolation [25]

L'élimination de la pollution par le procédé d'infiltration-percolation fait intervenir deux principaux mécanismes : la rétention et la dégradation biologique.

La rétention comprend les phénomènes de filtration mécanique et d'adsorption.

La filtration mécanique est un processus essentiellement physique. Elle dépend de la taille des particules et de la granulométrie de la matrice poreuse. Elle comprend le blocage et l'interception.

L'adsorption des particules en suspension est un processus physico-chimique. Elle fait intervenir les propriétés électriques des particules en suspension et la composition minéralogique du massif filtrant.

Trois types d'adsorption peuvent être distingués :

- l'adsorption due aux forces d'attraction de Van der Waals ;
- l'adsorption électrostatique due aux charges électriques de la particule en suspension et des grains de la matrice poreuse ;
- l'adsorption due aux interactions chimiques entre la particule en suspension et les grains du milieu poreux.

Les microorganismes de l'effluent et du massif filtrant sont responsables de la dégradation biologique des matières carbonées et azotées, de même que l'élimination de la pollution microbienne.

Ces microorganismes épurateurs sont fixés sur la matrice poreuse et forment un biofilm microbien. Il s'agit d'une communauté de microorganismes (bactéries, champignons,

algues ou protozoaires), qui adhèrent entre eux et à une surface, et qui secrètent une matrice adhésive et protectrice.

Le substrat et l'oxygène diffusent à travers le biofilm où la pollution se dégrade. Le métabolisme bactérien aérobie comporte deux processus très distincts : le catabolisme et l'anabolisme.

Les systèmes d'infiltration-percolation présentent l'avantage d'une gestion simple et de bonnes performances épuratoires. En revanche, ils sont sensibles au colmatage, lequel doit être absolument évité.

Le colmatage modifie les vitesses d'écoulement et de transfert d'oxygène au sein du massif. Si le colmatage permet d'augmenter les temps de contact eau – gaz – biofilm, indispensable à une bonne dégradation des polluants, il doit être limité pour maintenir des conditions de perméabilité et d'oxygénation nécessaires à la longévité du filtre.

Les études menées sur le colmatage des systèmes d'infiltration-percolation ont montré qu'il est difficile de prévoir l'échéance du colmatage.

Plusieurs travaux ont montré que le colmatage d'un massif filtrant n'est pas totalement irréversible. Il suffit de sécher et de bien aérer la plage d'infiltration pour faire disparaître la couche colmatante et restaurer les vitesses d'infiltration. Ces deux actions ont pour effet de dégrader la matière organique accumulée.

Dans la pratique, la gestion du colmatage consiste essentiellement à régler les alternances des périodes de fonctionnement et de séchage, de manière à contenir le colmatage et maintenir les capacités d'épuration.

La durée des phases de séchage est ajustée de façon à assurer une gestion convenable du colmatage. Cette durée dépend surtout des conditions climatiques. En effet, il est facile de résorber le colmatage sous climats ensoleillés et secs, mais c'est beaucoup plus difficile dans des régions humides et froides.

IV-2- Les filtres plantés de roseaux

Le procédé de traitement des eaux résiduaires urbaines par filtres plantés de roseaux constitue l'un des modes de traitement biologique aérobie par cultures fixées sur support fin. Cette filière d'épuration est parfaitement adaptée aux petites et moyennes collectivités et permet d'obtenir des performances épuratoires très élevées, en ce qui concerne

l'élimination de la pollution carbonée, des matières en suspension et des formes réduites de l'azote.

Les filtres plantés de roseaux assurent le traitement des eaux usées brutes domestiques simplement dégrillées.

Le procédé consiste à développer une biomasse épuratrice fixée dans des conditions aérobies sur des massifs filtrants. Ces derniers offrent un support au développement de bactéries et assurent la rétention physique des matières en suspension.

On distingue deux types de filtres plantés :

- Les Filtres Plantés de Roseaux à écoulement Vertical (FPRV) (Fig. 23) : l'eau s'écoule depuis la surface du lit vers l'intérieur, de manière verticale ;
- Les Filtres Plantés de Roseaux à écoulement Horizontal (FPRH) (Fig. 24) : l'eau s'écoule dans le lit de manière horizontale.

Dans les deux cas, les roseaux sont plantés dans les massifs filtrants constitués d'un substrat minéral d'une granulométrie soigneusement choisie. Ces massifs peuvent être étanches ou non. Un système non étanche permettrait aux eaux traitées de s'infiltrer dans le sol, qui participe ainsi à l'épuration. Selon les contraintes du site – perméabilité du sol, présence ou non d'une nappe phréatique, etc. et la réglementation locale, on s'orientera vers un système étanche ou non.

Le filtre planté de roseaux à écoulement vertical est alimenté en surface. L'effluent circule par percolation verticale à travers un massif de graviers fins. Ce massif filtrant permet de retenir les matières en suspension à la surface du filtre, où elles s'accumulent. Par ailleurs, les micro-organismes y assurent les processus de dégradation de la matière organique et un début de nitrification y est observé. Un FPRV peut donc effectuer à la fois le prétraitement, en retenant les matières solides, et le traitement, grâce à l'action des micro-organismes.

L'alimentation du filtre se fait généralement par bâchées : l'effluent s'accumule dans un réservoir en amont, puis un dispositif automatique d'alimentation permet de déverser un important volume d'effluents de façon séquentielle sur le filtre. Un système de distribution permet de répartir uniformément l'effluent sur toute la surface du lit. Ce type d'alimentation permet une utilisation optimale du volume du filtre.

Pour les massifs étanches, un système de drainage (par le fond du filtre) permet à la fois de récupérer les eaux en sortie et d'assurer une oxygénation du filtre par passage d'air.

Les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical sont souvent constitués de deux étages en série (massif filtrant à graviers au premier étage, massif filtrant à sables au deuxième étage), eux-mêmes constitués de plusieurs filtres en parallèle, qui fonctionnent en alternance. Les phases de repos sont nécessaires pour favoriser l'aération et l'apport d'oxygène à l'intérieur du massif afin d'y maintenir des conditions aérobies et pour réguler la croissance de la biomasse fixée. Elles permettent également aux dépôts de matière organique accumulés à la surface du lit de se déshydrater et de se minéraliser.

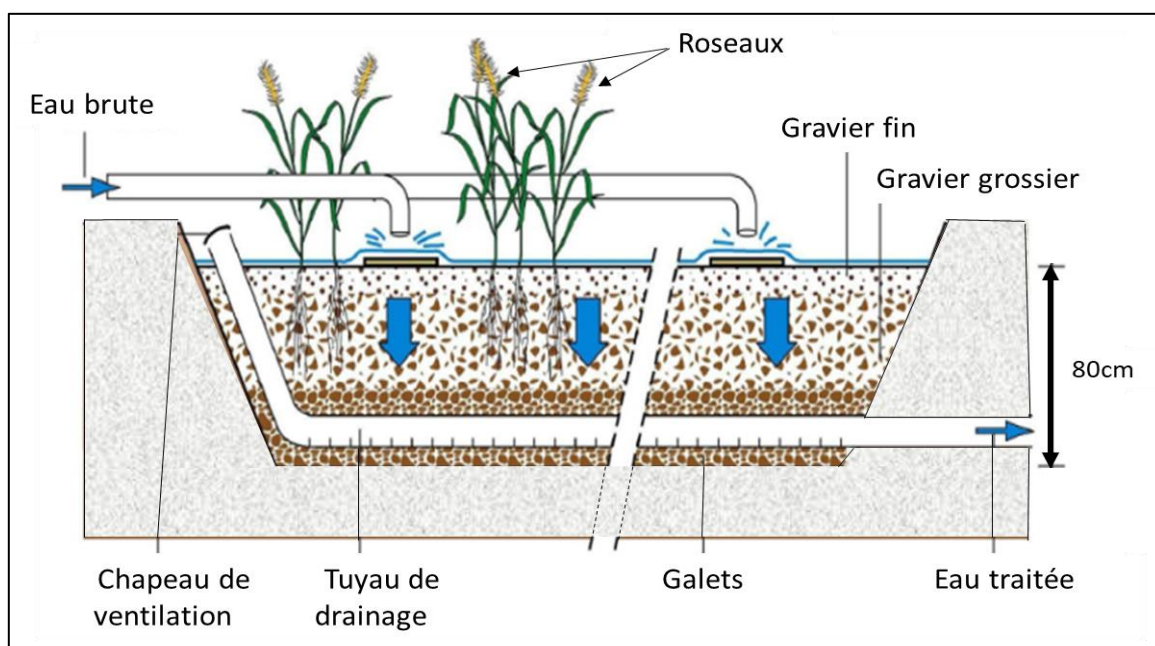


Figure 23 : Schéma d'une coupe transversale d'un filtre planté à écoulement vertical
[Source : Wikhydro]

Le filtre planté de roseaux à écoulement horizontal est saturé en eau. L'alimentation se fait en continu et la circulation de l'eau est horizontale, sous la surface du substrat (Figure 24). Un système de siphon en sortie permet de régler la hauteur d'eau dans le filtre, afin que ce dernier soit toujours rempli d'eau. En maintenant ainsi des conditions anaérobies, favorables au processus de dénitrification, un filtre planté de roseaux à écoulement horizontal permet d'assurer le traitement secondaire des effluents (élimination des nitrates). Notons cependant que le filtre planté de roseaux à écoulement horizontal ne peut recevoir que des eaux prétraitées, ou très peu chargées en matière en suspension. Cela permet d'éviter tout risque de colmatage du massif filtrant. Ce prétraitement est souvent réalisé dans une fosse toutes eaux ou par un filtre planté de roseaux à écoulement vertical placé en amont.

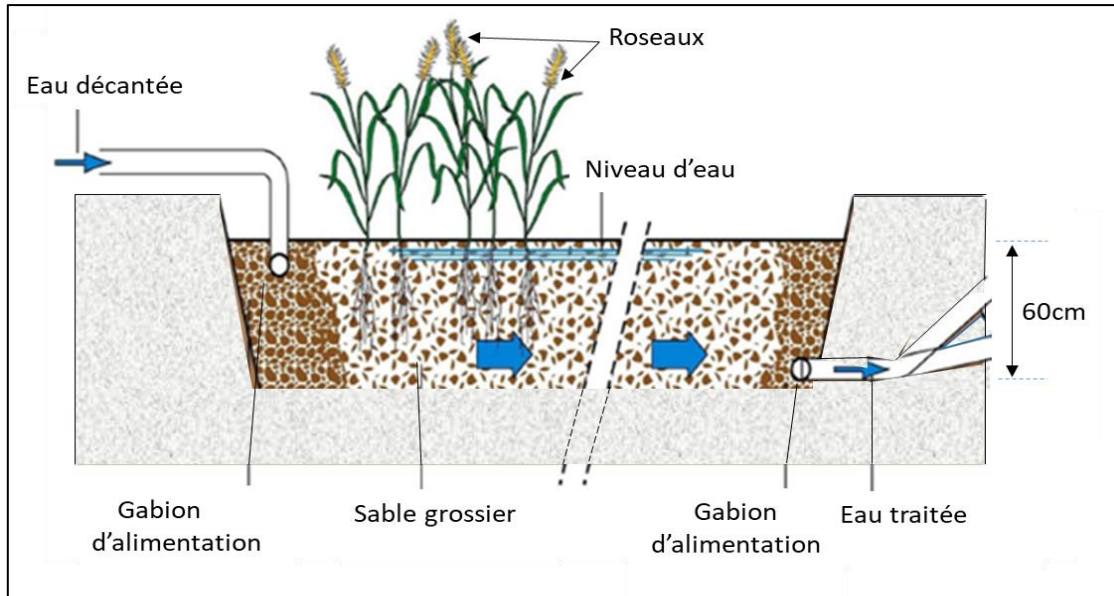


Figure 24 : Schéma d'une coupe transversale d'un filtre planté à écoulement horizontal [Source : Wikhydro]

IV-3- Le lagunage

Le lagunage naturel est un procédé d'épuration biologique des eaux usées domestiques. C'est un procédé rustique et moins onéreux [26]. Il consiste à faire circuler lentement des effluents prétraités dans une succession de bassins peu profonds pendant un temps suffisamment long pour réaliser les processus naturels de l'autoépuration (Fig. 25). Il est pratiqué dans les régions très ensoleillées, dans des bassins de faible profondeur.

Le principe général consiste à recréer, dans des bassins, des chaînes alimentaires aquatiques. Le rayonnement solaire est la source d'énergie qui permet la production de matières vivantes par les chaînes trophiques. Les substances nutritives sont apportées par l'effluent alors que les végétaux sont les producteurs du système en matière consommables et en oxygène.

Il existe plusieurs types du procédé de lagunage à savoir le lagunage naturel à microphytes, à macrophytes ou mixte et le lagunage aéré.

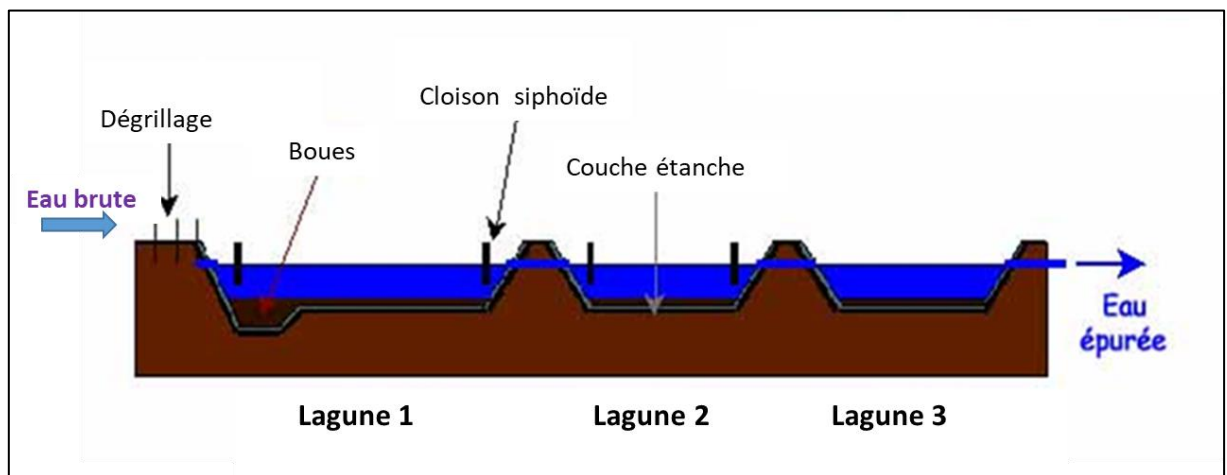


Figure 25 : Schéma montrant le principe du fonctionnement de lagunage naturel [10]

Conclusion générale

Le traitement des eaux usées est indispensable pour protéger l'environnement et préserver les ressources en eau et la santé humaine. Ce cours a mis l'accent sur les différents types d'eaux usées, leurs caractéristiques, et les différentes méthodes employées pour leur épuration. Les traitements conventionnels adoptés dans les stations d'épuration, qu'ils soient primaires, secondaires ou tertiaires, offrent des solutions efficaces pour l'élimination de la charge polluante contenue dans les eaux résiduaires, tandis que les filières extensives, comme les filtres plantés de roseaux, l'infiltration-percolation et le lagunage, présentent des alternatives durables, adaptées aux contextes spécifiques.

En combinant technologies avancées et solutions basées sur la nature, il est possible de gérer de façon efficace les eaux usées tout en réduisant leurs impacts sanitaires et environnementaux.

Références bibliographiques

- [1] Kay D., Edwards A.C., McDonald A.T., Stapleton C.M., Wyer M., Crowther J. (2007): « Catchment microbial dynamics: the emergence of a research agenda ». *Prog. Phys. Geogr.* ; 31:1-18.
- [2] Rejsek F. (2002) *Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques*. Scéren (CRDP AQUITAINE). Coll. Biologie technique. Sciences et techniques de l'environnement. 360p.
- [3] Metahri M.S. (2012.) *Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes cas de la step de la ville de tizi-ouzou*, thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 172p.
- [4] Rodier J. (2005) *L'Analyse de l'eau - Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer : chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats*. 8ème Edition. DUNOD, Paris, 1381p.
- [5] Kendouci M.A. (2018) *Etude de risque de pollution des eaux souterraines de la ville de Béchar et valorisation du sable en vue de son utilisation en traitement des eaux usées*, thèse de doctorat. USTO-MB, Algérie.
- [6] Kerch G., Vernus E. (2001) *Toxicité des métaux. Techniques de l'Ingénieur*, G2450. pp.1-17.
- [7] Belaid N. (2010) *Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax: salinisation, accumulation et phyto-absorption des éléments métalliques*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 236p.
- [8] Tabet M. (2015) *Etude physico-chimique et microbiologique des eaux usées et évaluation du traitement d'épuration*. Thèse de doctorat, Université Guelma, Algérie, 161p.
- [9] Desjardins R. (1997) *Le traitement des eaux*. 2^{ème} édition revue et améliorée. *Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal*, ISBN : 2-553-00643-8, 304p.
- [10] Ouanouk B. (2014) *Gestion de l'environnement : Traitement des eaux usées*. Edition Pages Bleues Internationales, 221p. ISBN : 978-9947-34-46-2.

- [11] Chosson A., Jamet J., Bernhard S. (2010) L'assainissement individuel des eaux usées, 2e édition, Guide CLCV, 159p. ISBN : 978-2-7117-6457-0.
- [12] Schriver-Mazzuoli (2012) La gestion durable de l'eau : Ressources, Qualité, Organisation. DUNOD, Paris, 250p. ISBN : 978-2-10-10-055026-5.
- [13] Martin-Lagardette J.L. (2004) L'eau potable et l'assainissement. Johanet Editions, Paris, 154p. ISBN : 2-900086-53-1.
- [14] Aussel H., Le Bâcle C., Dorinier G, Galtier Y. (2004) Le point des connaissances sur le traitement des eaux usées. 4p.
- [15] Cardot C. (2001) Techniques appliquées au traitement de l'eau, Edition *ELLIPSES*, ISBN : 978-2-7298-0494-7, 248p.
- [16] Lakehal M. (2021) Assainissement. Département d'hydraulique, Faculté de Technologie, Université Badji Mokhtar, Algérie. 125p.
- [17] Cardot C. (1999) Les traitements de l'eau : Procédés physico-chimiques et biologiques, Edition *ELLIPSES*, ISBN : 2-7298-598-0, 254p.
- [18] Quevauviller P., Thomas O., Van der Beken A. (2006) Wastewater quality monitoring and treatment. John Wiley & Sons, Ltd, 394p. ISBN: 978-0-471-49929-9.
- [19] Bessedik M. (2017) Traitement de l'eau. Faculté de Technologie, Université Abou Beker Belakid, Telemcen, Algérie, 70p.
- [20] Grosclaude G. (1999) L'eau : Usages et polluants. Tome 2, Editions Quae, 210p.
- [21] Ohanssian K. (2019) Optimisation de filières de traitement des eaux résiduaires industrielles par couplage de procédés physico-chimiques thermiques et biologiques. Thèse de doctorat, Université d'Aix Marseille, France, 244p.
- [22] Séguret F. (1998) Etude de l'hydrodynamique des procédés de traitement des eaux usées à biomasse fixée - application aux lits bactériens et aux biofiltres. Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, France [*physics.flu-dyn*].
- [23] Perret J.M., Canler J.P. (2013) Affinage du traitement de la pollution particulaire par les procédés mécaniques « rustiques », Rapport Final. Irstea, centre de Lyon – Villeurbanne, 84p.

- [24] Zhang J.B. (2011) Procédé de traitement anaérobie des boues et de valorisation du biogaz. Thèse de doctorat, Institut National de Polytechnique de Lorraine, France, 232p.
- [25] Bali M. (2012) Etude expérimentale et modélisation du traitement des eaux usées domestiques par infiltration-percolation en zone aride. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tunis, Université d'El Manar, Tunisie, 212p.
- [26] Boughanzai L., Merzouki M., Ouzina A. (2012) Dimensionnement d'une station d'épuration de type lagunage naturel au centre d'Ain Cheggag, Fès, Maroc, *Revue Agrobiologia*, 2 : 29-33.