

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf- Mila

Institut des sciences et de la Technologie

Département de Science de la Nature et de la vie

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Science de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biochimie Appliquée

Thème :

Les enzymes dégradants les polluants des eaux usées

Préparé par :

- Mouchemouhe somia
- Bouhadadd saida

Devant le jury composé de :

M^{me} MERZOUG Amina
M^{me} BOUCHERIT Hanane
M^{me} HARRIECHE Ouahiba

Maître de Conférence B
Maître de Conférence B
Maître Assistant A

Présidente
Examinatrice
Promotrice

Année Universitaire : 2020/ 2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Handwritten signature: محمد بن عبد الله



Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, Dieu, le tout puissant de nous avoir donné la force et la résolution afin de réaliser ce modeste travail. Nous remercions vivement :

*Notre promotrice **M^{me} Harrieche Ouahiba** d'avoir accepté de nous encadrer, ainsi que, pour tous ses : orientations scientifiques, sa patience, ses précieux conseils et notamment son bon cœur.*

***M^{me} Merzoug Amina** d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

***M^{me} Boucherit Hanane** d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.*





Dédicace

Les jours ont passé dans ma vie, j'ai commencé par une étape, et aujourd'hui je récolte les fruits de mes efforts. Une procession d'années au cours desquelles mon objectif était clair et chaque jour je m'efforce de l'atteindre et de l'atteindre, peu importe la difficulté. C'était à celle qui m'a donné son sang, son âme et sa vie, son amour et sa détermination et qui m'a poussé pour un avenir meilleur ma mère Nassira. Au cher qui m'a donné et m'a donné sans me priver mon père Ammar. A ceux dont l'amour coule dans mes veines, et mon coeur s'attarde dans leur mémoire, aux coeurs tendres apparents et aux âmes innocentes, mes frères Tawfiq, Fawzi et Fouad et mes soeurs Nawal, Safaa et Marwa. A celui qui m'a donné une idée et m'a donné son coeur à mon partenaire de vie, mon cher mari Ayoub





Dédicace

Je dédie ce travail aux personnes les plus chères de ce monde :

*A mon cher père, que dieu lui fasse miséricorde, **Bachir** et ma chère mère, **Hadjira** à leurs dévouements, leurs amours et leurs sacrifices, d'encouragements, sans lequel je ne serais pas ici aujourd'hui. Ce travail soit pour-ils, un faible témoignage de ma profonde affection de tendresse*

*A mes sœurs **Mouna** et **Messaouda** et **Iness***

*A mon frère **KhirEddin**, **Fateh**, **Messaoud**, **Mouhamed**, **Achraf Eddin***

Merci pour leurs encouragements, pour leur soutien moral et physique et leur présence dans les moments les plus difficiles

*A toute ma famille **Bouhaddad. Omara.***

*A Tous mes amis surtout **Karima**, **Nawel** de votre présence, soutien et de m'avoir encouragée à aller plus loin.*

A tous mes enseignants

A tous les autres que je n'ai pas cités mais à qui je pense aussi.

Merci à tous de m'aider à devenir meilleur.



Saida

Table des matières

Remerciements

Dédicace

Table des matières I

Liste des abréviations..... IV

Liste des figures VI

Résumés..... VII

Introduction V

Synthèse bibliographique

Chapitre 1 :Les eaux usées

1. Définition 3

2. Les origines des eaux usées 3

2.1. Eaux usées domestiques..... 3

2.2. Les eaux usées industrielles 5

2.3. Les eaux agricoles 5

2.4. Les eaux pluviales 5

3. Composition des eaux usées 6

3.1. Les microorganismes 6

4. Types de pollution de l'eau 8

4.1. Pollution physique 8

4.2. Pollution chimique 8

Chapitre 2 :Traitementdes eaux usées

1. Définition.. 11

2. Les étapes de traitement 11

2.1 Les prétraitements (traitement préliminaire) 11

2.2. Le traitement primaire (traitement physico-chimique) 12

2.3. Traitement secondaire (traitement biologique)	13
2.4. Le traitement tertiaire	17
Chapitre 3 :Les enzymes dégradant les polluants des eaux usées	
Introduction	19
1. Les enzymes dégradant les eaux usées	19
1.1. Définition	19
2. Traitement enzymatique dans différents polluants des eaux usées	20
2.1. Sélection d'enzymes	20
2.2. Dégradation assistée par LiP des polluants dangereux	20
2.3. Dégradation assistée par MnP des polluants dangereux	22
2.4. Dégradation assistée par la peroxydase polyvalente	23
2.5. Dégradation assistée par les peroxydases décolorantes.	23
2.6. Dégradation assistée par HRP	23
2.7. Dégradation assistée par laccases des polluants dangereux	25
2.8. Dégradation assistée par les tyrosinases des polluants dangereux	26
3. Performance de la biodégradation enzymatique des polluants des eaux usées	27
3.1. Biodégradation des huiles et graisses	27
3.2. Biodégradation des médicaments	28
3.3. Biodégradation des pesticides	29
3.4. Biodégradation des produits de soins personnels	30
3.5. Biodégradation des produits chimiques industriels	30
4. les systèmes de traitement des eaux usées liés aux enzymes	32
4.1. Systèmes enzymatiques libres	32
4.2. Les systèmes enzymatiques immobilisés	32
4.3. Les systèmes liés aux médiateurs enzymatiques	34
5. Traitement de la pollution minérale	34
5.1. Traitement de l'azote	35

5.2. Traitement du phosphore.	37
5.3. Elimination du sodium.	37
5.4. Elimination du calcium et du magnésium	38
5.5. Elimination du silicium.....	39

Conclusion

Référence bibliographique

Liste des abréviations

ABTS : Acide 3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique

AOB : Ammonia Oxidizing Bacteria

CEC : Capacité d'échange cationique

CHO : Choline oxydase

CPO : Chloroperoxydase immobilisée

DyP : Peroxydases décolorantes

HBA : L'alcool 4-hydroxybenzylique

HBT : Hydroxybenzotriazole

HRP : La peroxydase C

LiP : Lignine peroxydase

MnP : Manganèse peroxydase

NaCl : Chlorure de sodium

NOB : Nitrite Oxydizing Bacteria

NPX : Naproxène

OAP : Organismes accumulateurs de phosphore

OPAA : L'anhydrolase acide organophosphorée

Ophs : Hydrolases organophosphorées

PA : Polyamide

PE : Polyéthylène

PET : Polyéthylène téréphtalate

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PUR : Le polypropylène

PVC : Polychlorure de vinyle

RB-5 : Noir réactif 5

RB-19 : Bleu réactif 19

SA : Syringaldéhyde

SAF : Les anions des sels d'acide forte

TCS : Triclosan

VLA : L'acideviolurique

VP : La peroxydase polyvalente

WRF : Les champignons de la pourriture blanche

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
Figure1	Eaux usées dans le cycle de l'eau	03
Figure2	Classification des eaux usées domestiques	04
Figure3	Schéma d'un prétraitement d'une station d'épuration.	12
Figure4	Traitement par boues activées	14
Figure5	Schéma de la filière lits bactériens	15
Figure6	Lagunage naturel	15
Figure 7	Mécanisme de l'oxydation biologique aérobie	16
Figure 8	Mécanisme de la digestion anaérobie des boues	17
Figure 9	Une voie de dégradation schématique de l'orange de méthyle, en tant que colorant modèle, dans la présence de LiP en tant que nouvel agent catalyseur	20
Figure 10	Mécanisme catalytique de la LiP	21
Figure 11	Mécanisme catalytique de la MnP	22
Figure 12	Inactivation de l'enzyme HRP par H ₂ O ₂ pouvant se produire durant un cycle catalytique (composé aromatique considéré : le phénol)	23
Figure 13	Voies catalytiques assistées par la peroxydase ; (A) RB-5 et (B) RB-19.	24
Figure 14	Cycle catalytique simplifié du système laccase-médiateur	25

Résumé :

L'étude présente a pour objectif de rassembler les connaissances en relation avec l'application des enzymes au domaine de traitement des eaux usées afin de réutiliser l'eau sans danger et préserver l'environnement où elle sera rejetée. Dans la première partie on a parlé de l'origine et la composition chimique et microbiologique des eaux usées puis les principaux types de pollution de l'eau. Dans la deuxième partie on a abordé les étapes du traitement des eaux usées qui permettent la dégradation des polluants en particulier le traitement biologique. Enfin dans la troisième partie on a parlé du traitement enzymatique de divers polluants des eaux usées et dans lequel on a présenté les enzymes et leurs modes d'action dans ce contexte.

Mots clés : eaux usée, traitement biologique, enzyme, polluants, dégradation.

الملخص

تهدف الدراسة المقدمة إلى جمع المعرفة فيما يتعلق بتطبيق الإنزيمات في مجال معالجة مياه الصرف الصحي من أجل إعادة استخدام المياه بأمان والحفاظ على البيئة التي سيتم تصريفها فيها. تحدثنا في الجزء الأول عن الأصل والتركيب الكيميائي والميكروبيولوجي لمياه الصرف الصحي ثم الأنواع الرئيسية لتلوث المياه. في الجزء الثاني، تناولنا مراحل معالجة مياه الصرف الصحي التي تسمح بتحليل الملوثات، ولا سيما المعالجة البيولوجية. أخيرًا في الجزء الثالث تحدثنا عن المعالجة الأنزيمية للملوثات المختلفة لمياه الصرف الصحي والتي قدمنا فيها الإنزيمات وطرق عملها في هذا السياق.

الكلمات المفتاحية: مياه الصرف الصحي، المعالجة البيولوجية، الإنزيم، الملوثات، تحلل.

Abstract:

The presented study aims to bring together knowledge in relation to the application of enzymes to the field of wastewater treatment in order to reuse water safely and preserve the environment where it will be discharged. In the first part we talked about the origin and the chemical and microbiological composition of wastewater and then the main types of water pollution. In the second part, we approached the stages of wastewater treatment which allow the degradation of pollutants, in particular biological treatment. Finally in the third part we talked about the enzymatic treatment of various pollutants of wastewater and in which we presented the enzymes and their modes of action in this context.

Keywords: wastewater, biological treatment, enzyme, pollutants, degradation.

Introduction

Introduction

L'eau constitue un élément essentiel dans la vie et l'activité humaine. C'est une composante majeure du monde minéral et organique. Actuellement, l'eau participe à toutes les activités quotidiennes notamment domestiques, industrielles et agricoles ce qui la rend un élément récepteur exposé à tous les genres de pollution. Dès lors, l'eau sera considérée comme un transporteur potentiel de maladies. La pollution des eaux de surface et souterraines est possible par les rejets des eaux usées tant domestiques qu'industrielles ainsi que par l'utilisation d'engrais et de pesticides en agriculture.

Le traitement ou l'épuration des eaux usées a donc pour objectif de réduire la charge polluante. L'élimination de la pollution organique est essentiellement le fait de procédés d'épuration biologiques basés sur la transformation de la pollution en biomasse appelée boue. Parmi les procédés biologiques de traitement des eaux usées le procédé le plus utilisé est celui de la boue activée. Cette dernière est un écosystème formé, en majeure partie, par des bactéries, protozoaires et métazoaires. Les bactéries s'agglomèrent sous la forme de flocons qui sont formés par des bactéries filamenteuses (**Rejsek, 2002**).

Actuellement, l'industrie des enzymes est en pleine progression et son chiffre d'affaires global croît à un rythme régulier. Une grande partie de ce marché est liée aux enzymes de type hydrolytique comme les protéases, les lipases et les cellulases, cependant, les enzymes restent sous employées et peu exploitées, en particulier dans le domaine du traitement des eaux usées, car la domination des produits chimiques moins dispendieux tend à demeurer. Afin de rendre les enzymes plus compétitives par rapport aux produits chimiques, il est essentiel d'en abaisser les coûts de production. (**Drouin, 2013**).

Puisque la plupart des nouvelles technologies sont axées vers des considérations de plus en plus écologiques et environnementales, les divers procédés d'épuration des eaux usées doivent savoir s'adapter en ce sens en utilisant les enzymes ou des systèmes multienzymatiques.

Ainsi, ce manuscrit se compose de trois chapitres, le premier chapitre résume les différents types des eaux usées avec les types de pollution. Le deuxième chapitre parle de l'épuration des eaux usées avec les étapes de traitement traditionnelle. Enfin le troisième chapitre traite toutes les enzymes utilisées pour la dégradation de certains polluants qui peuvent exister dans les eaux usées.

Chapitre 1 :

Les eaux usées

Chapitre 1 : Les eaux usées

1. Définition

«La pollution de l'eau s'entend comme, une modification défavorable ou nocive des propriétés physico-chimiques et biologiques de l'eau produite, directement ou indirectement, par les activités humaines, les rendant impropres à l'utilisation normale établit» (Metahri,2012).

Les eaux usées sont toutes les eaux des activités domestiques, agricoles et industrielles chargées en substances toxiques qui parviennent dans les canalisations d'assainissement. Les eaux usées englobent également les eaux de pluies et leur charge polluante (Figure 1). Elles engendrent au milieu récepteur toutes sortes de pollution et de nuisance (Metahri, 2012).

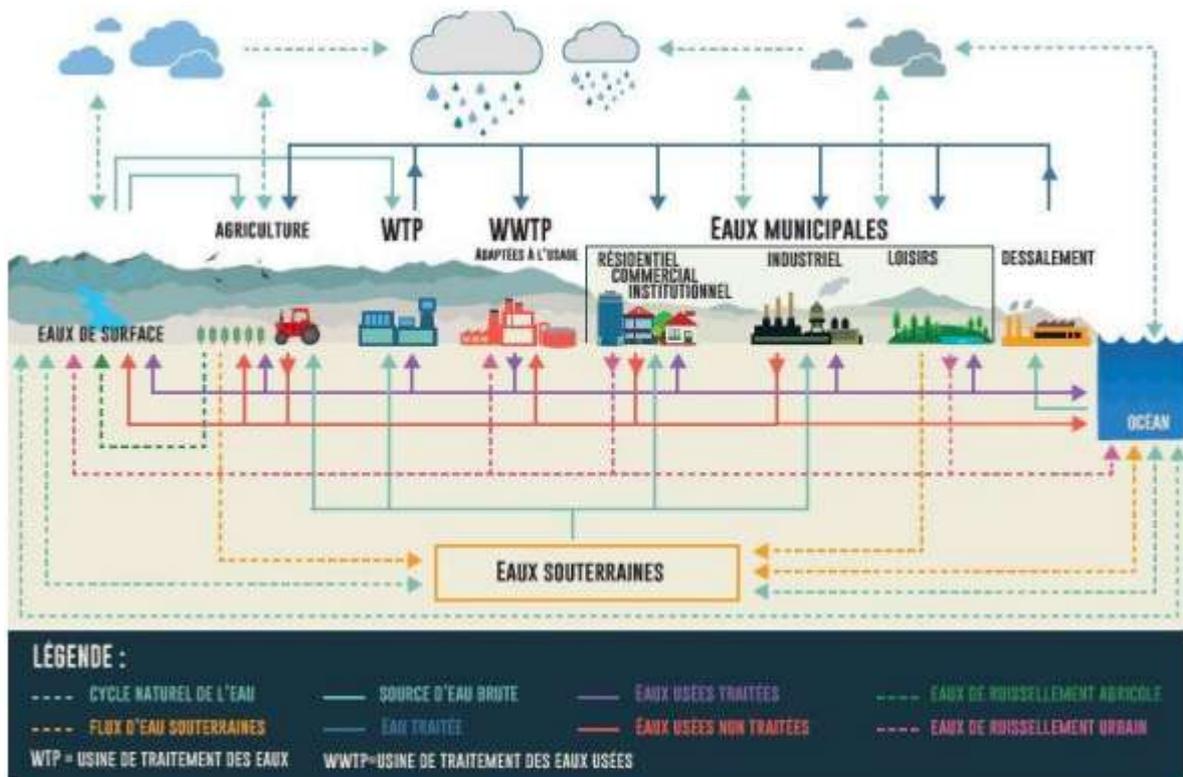


Figure 1 : Les eaux usées dans le cycle de l'eau (Site 01, 2021).

2. Les origines des eaux usées

2.1. Eaux usées domestiques

La caractérisation des eaux usées domestiques par source d'émission suggère de différencier l'ensemble des lieux source où sont produites des eaux usées à l'échelle de l'habitat (figure 2) (Boutin et Eme, 2015).

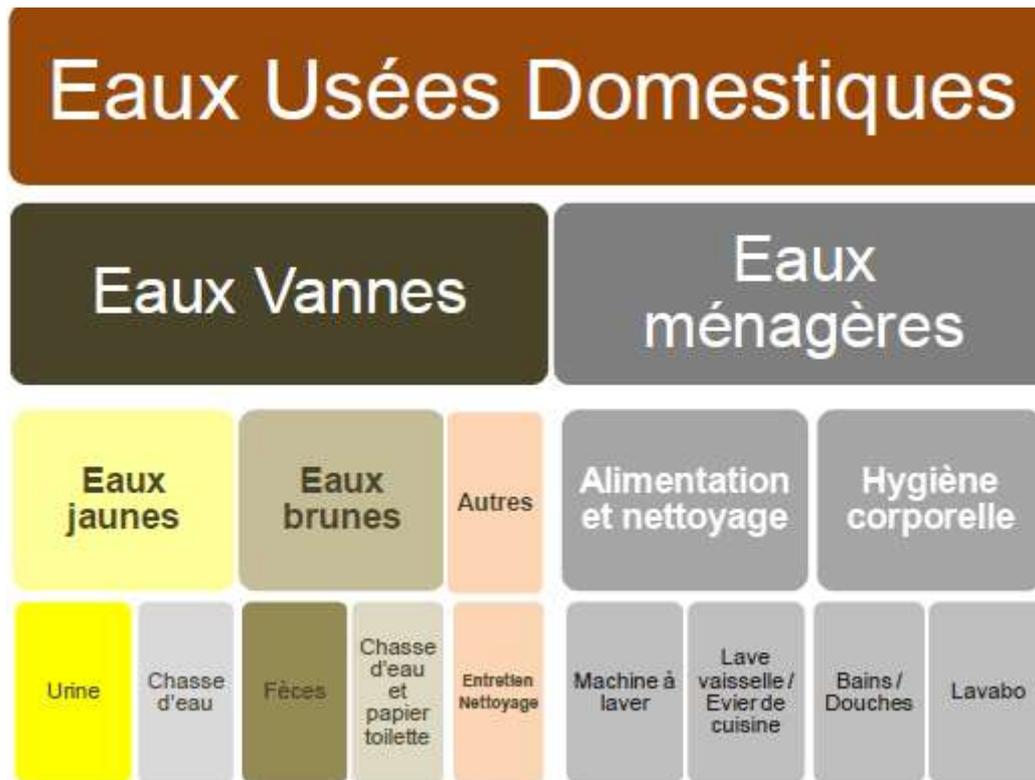


Figure2 : Classification des eaux usées domestiques (Eme et Boutin, 2015)

Pour les **eaux vannes**, on distingue la collecte classique d'eaux issues des toilettes, de la collecte sélective associée au développement de nouvelles toilettes. Comparé au cabinet de toilette classique, les toilettes à séparation permettent la collecte sélective d'eaux jaunes (eau déchasse et urine) et d'eaux brunes (fèces, eaux de chasse et papier toilette). Les apports considérés comme accidentels comme les eaux de ménage dans les toilettes, mégots, ... sont également répertoriés (Eme et Boutin, 2015).

Les **eaux ménagères** présentent des sources d'émission variées dont les caractéristiques sont liées aux équipements proprement dits et aux usages individuels : évier de cuisine, lave-vaisselle, lave-linge, Lavabo de salle de bain, douche, baignoire. Ces usages sont classés en deux rubriques : les eaux ménagères liées aux activités alimentaires et de nettoyage (eaux de cuisine et lave-linge) et les eaux ménagères issues de l'hygiène corporelle, effluents provenant de la salle de bain (Eme et Boutin, 2015).

2.2. Les eaux usées industrielles :

Ce sont les eaux usées qui proviennent de locaux utilisés à des fins industriels, commerciales, artisanales ou de services, leurs eaux de refroidissement de pompes à chaleur et de climatisation (Aba Aaki, 2012).

Chapitre 1 : Les eaux usées

Les eaux usées industrielles doivent faire l'objet, avant rejet vers le réseau public, d'un traitement adapté à leur nature afin d'assurer la protection du milieu récepteur « Norme de rejet indirect ». La composition de ces eaux est liée à l'activité industrielle. On peut catégoriser les établissements industriels sur la base des secteurs d'activité industrielle de la classification SIC (Standard Industriel Classification) en les répartissant en neuf secteurs qui sont :

- Les fabriques de pâtes à papiers.
- Les raffineries de petrol.
- Les industries de la métallurgie primaire.
- Les industries chimiques organique et inorganique à l'exception des raffineries de pétrole.
- Les industries de transformation du métal (métallurgie secondaire, machinerie, équipements électroniques, matériel de transport, instrument de mesure...etc.).
- Les industries agro-alimentaires.
- Les industries de textile et du vêtement.
- Les industries de transformation du bois (scieries, fabrication de meubles, ...etc.).
- Les industries diverses non classées dans les secteurs précédents par exemple (transformation de la pierre, de l'argile, de l'imprimerie...etc.) (**Aba Aaki, 2012**).

2.3. Les eaux agricoles :

Ces effluents proviennent des terres cultivées après lessivages et ruissellement. Ces eaux sont riches en éléments fertilisants (azote et phosphore) et en polluants organiques (pesticides) (**Aba Aaki, 2012**).

2.4. Les eaux pluviales :

Ce sont des eaux de ruissellement qui se forment après une précipitation. Elles peuvent être particulièrement polluées, surtout en début de pluie, par deux mécanismes :

- Le lessivage des sols et des surfaces imperméabilisées. Les déchets solides ou liquides déposés par temps sec sur ces surfaces sont entraînés dans le réseau d'assainissement par la première précipitation qui se produit.
- La remise en suspension des dépôts des collecteurs. Par temps sec, l'écoulement des eaux usées dans les collecteurs du réseau est lent, ce qui favorise le dépôt de matières

Chapitre 1 : Les eaux usées

décantables. Lors d'une précipitation, le flux d'eau plus important permet la remise en suspension de ces dépôts.

Elles sont de même nature que les eaux usées domestique, avec en plus, des métaux lourds et des toxiques (plomb, zinc, hydrocarbures) provenant essentiellement de la circulation automobile (**Rejsek, 2002**).

3. Composition des eaux usées :

3.1. Les microorganismes :

Ils proviennent de plusieurs sources comme les rejets des hôpitaux, l'agriculture ainsi que les rejets domestiques. L'eau se charge alors de microorganismes pathogènes (bactéries, virus et parasites) qui peuvent être dangereux pour l'environnement et pour la santé humaine (**Benkaddour, 2018**).

3.1.1. Les virus :

Les virus sont des organismes de très petite taille (10 à 350 nm). Ils ne sont constitués que d'une molécule d'ADN ou d'ARN, entourée d'une capsid. Ne possédant ni noyau, ni capacité de synthèse, ce sont des parasites obligatoires d'une cellule vivante dont ils détournent, à leur profit, les systèmes enzymatiques, énergétiques et de synthèse.

L'infection d'un individu par un virus hydrique se produit dans la majorité des cas par l'ingestion, sauf pour le Coronavirus où elle peut aussi avoir lieu par inhalation. Les virus sont relativement spécifiques d'un hôte. Il existe des virus adaptés à chaque type d'hôtes (animaux, hommes, plantes, champignons, algues, bactéries). Les virus entériques, transmis par ingestion sont, les plus importants pour la santé humaine (**Elourdassi, 2011**).

3.1.2. Les bactéries :

Les bactéries sont des procaryotes de taille variable entre 0,1 et 10 μm . Elles possèdent tout le matériel cellulaire nécessaire à leur multiplication. Certaines d'entre elles peuvent être rencontrées sous forme de spores.

En fait, ce phénomène de sporulation a lieu en réponse à un environnement qui leur est peu favorable. Le pouvoir pathogène d'une bactérie est soit spécifique (il engendre des pathologies spécifiques), soit opportuniste (il ne s'exprime que sur des individus affaiblis) (**Elourdassi, 2011**).

Chapitre 1 : Les eaux usées

3.1.3. Les champignons :

Ce sont des organismes privés de tout organe de locomotion, incapables d'effectuer la photosynthèse et, de ce fait, réduit à l'état de parasite ou à celui de saprophytes (organismes qui tirent leur nourriture de matières organiques en voie de décomposition).

Les champignons recherchés dans l'eau se transmettent par voie cutanéomuqueuse et sont à l'origine d'infections cutanées. Ce sont les moisissures et les levures (mycètes unicellulaires). Parmi les moisissures, nous pouvons citer comme espèces pathogènes : *Allescheria Boydii*, *Geotrichum candidum* et *Aspergillus fumigatus*.

Parmi les levures, nous pouvons citer *Candida albicans*, espèce très répandue, d'origine fécale, et responsables de diverses mycoses (infections cutanéomuqueuses buccales, vaginales et cutanées) (Elourdassi, 2011).

3.1.4. Les protozoaires :

Ce sont des organismes eucaryotes, unicellulaires, mobiles et de petite taille (de 1 à 500 µm.). Ils se nourrissent essentiellement de bactéries et de molécules organiques dissoutes mais présentent une très grande variété de types trophique : certaines se nourrissent de bactéries, certains d'algues, certains d'autres protozoaires et certains de plusieurs de ces organismes. Leur rôle principal est la clarification de l'effluent par prédation des bactéries libres de l'eau interstitielle (Rejsek, 2002).

3.1.5. Les métazoaires :

Sont des organismes pluricellulaires, de taille supérieure à 100 µm. Leur organisation cellulaire est plus complexe que celle des protozoaires, avec une différenciation cellulaire pour former des tissus. Leur temps de reproduction est généralement plus long du fait de leur complexité. Dans les boues activées, se retrouve essentiellement deux familles : les Rotifères et les Nématodes (Rejsek, 2002).

3.1.6. Les helminthes :

Il peut s'agir de vers plats (plathelminthes), ou ronds (némathelminthes) qui comprennent de nombreuses formes de parasites souvent à l'origine de maladies très graves. Ce sont pour la plupart, des vers intestinaux, rejetés avec les matières fécales animales ou humaines (souvent sous forme d'œufs très résistants). La contamination se fait par voie digestive lors de l'absorption d'eau contaminée par des œufs ou des larves, ou alors par voie transcutanée c'est à dire, par fixation puis pénétration de larves à travers la peau vaginales et cutanées) (Elourdassi, 2011).

Chapitre 1 : Les eaux usées

4. Types de pollution de l'eau :

4.1. Pollution physique :

Elle résulte de différents éléments solides entraînés par les rejets domestiques et industriels. On distingue :

- **Pollution solide** : elle provient des particules solides apportées par les eaux industrielles ainsi que les eaux de ruissellement et issue des décharges de déchets à ciel ouvert ;
- **Pollution thermique** : causée généralement par les eaux des circuits de refroidissement des usines. En effet tout changement de température de l'eau a des conséquences significatives sur l'équilibre écologique du milieu aquatique naturel et la survie des organismes vivants ;
- **Pollution radioactive** : liée aux rejets des éléments radioactifs par les installations et les centrales nucléaires ainsi que les usines de traitement de déchets radioactifs. (Benkaddour, 2018).

4.2. Pollution chimique :

Ce type de pollution est classé en deux catégories :

- La pollution biodégradable.
- La pollution non biodégradable.

Parmi les polluants non biodégradables figurant les substances minérales et certaines composés organiques tels que les composés aromatiques. Les composés biodégradables se composent de substances organiques de composés azotés et phosphoriques (Guergour, 2014).

4.2.1. Pollution chimique d'origine minérale :

Les substances minérales peuvent être classées en :

- Eléments essentiels : N, P, Na.....
- Eléments désirables : Fe, Mn, Zn, Cu.....
- Eléments toxiques : Pb, Se, Hg, As, Cr, Sn, Cd, (Guergour, 2014).

4.2.2. Pollution chimique d'origine organique :

Ce type de pollution constitue une partie importante de la pollution hydrique. Parmi les polluants chimiques d'origine organique figurent :

Chapitre 1 : Les eaux usées

- Les détergents.
- Les pesticides.
- Les phénols.
- Les hydrocarbures.
- Les matières organiques banales (protides, lipides...) (**Guergour, 2014**).

Chapitre 2 :

**Traitement
des eaux usées**

Chapitre 2 : Traitement des eaux usées

1. Définition :

La station d'épuration d'une agglomération urbaine importante comporte une chaîne de traitement dont la complexité dépend du degré d'épuration jugé nécessaire (**Ouali, 2017**).

2. Les étapes de traitement :

L'ensemble des ouvrages de traitement utilisés s'appelle la filière de traitement. Elle consiste à associer judicieusement différentes étapes pour satisfaire à une qualité d'eau traitée compatible avec la qualité du milieu récepteur (**Rejsek, 2002**). La dépollution des eaux usées se décompose en quatre étapes :

- Les prétraitements.
- Le traitement primaire.
- Le traitement secondaire.
- Le traitement tertiaire.

2.1 Les prétraitements (traitement préliminaire) :

Ils permettent d'éliminer les matières les plus grossières, susceptibles d'endommager les organes mécaniques ou de perturber l'efficacité des étapes ultérieures (**Rejsek, 2002**). Il s'agit de :

2.1.1 Le dégrillage :

Permet d'éliminer les matières volumineuses (bouteilles, bois...) charriées par les eaux brutes et qui pourraient provoquer l'obturation de différentes unités de l'installation et nuire à l'efficacité des traitements ultérieurs. Le dégrillage est assuré par des grilles dont l'écartement des barreaux varie suivant la taille des objets à piéger (**Jardé, 2002**).

2.1.2 Le tamisage :

Assure un dégrillage poussé par filtration des eaux brutes sur toile, treillis ou tôle perforée, à mailles plus ou moins fines afin d'éliminer les matières solides (impuretés) présentes dans l'eau (**Jardé, 2002**).

Chapitre 2 : Traitement des eaux usées

2.1.3. Le dessablage :

Permet d'éliminer les graviers, sables ou particules minérales grâce à des pièges à sédiments, afin d'éviter le dépôt de ces particules dans les installations et de protéger les unités de traitement contre l'abrasion (**Jardé, 2002**).

2.1.4. Le déshuilage :

Consiste à récupérer grâce à des racleurs, les graisses domestiques ou industrielles qui se trouvent à la surface des eaux usées naturellement ou par flottation (injection de fines bulles d'air) (**Jardé, 2002**).

Après les étapes des pré-traitements, les eaux usées sont acheminés vers la filière «eau» dans les processus d'épuration (**figure 3**).

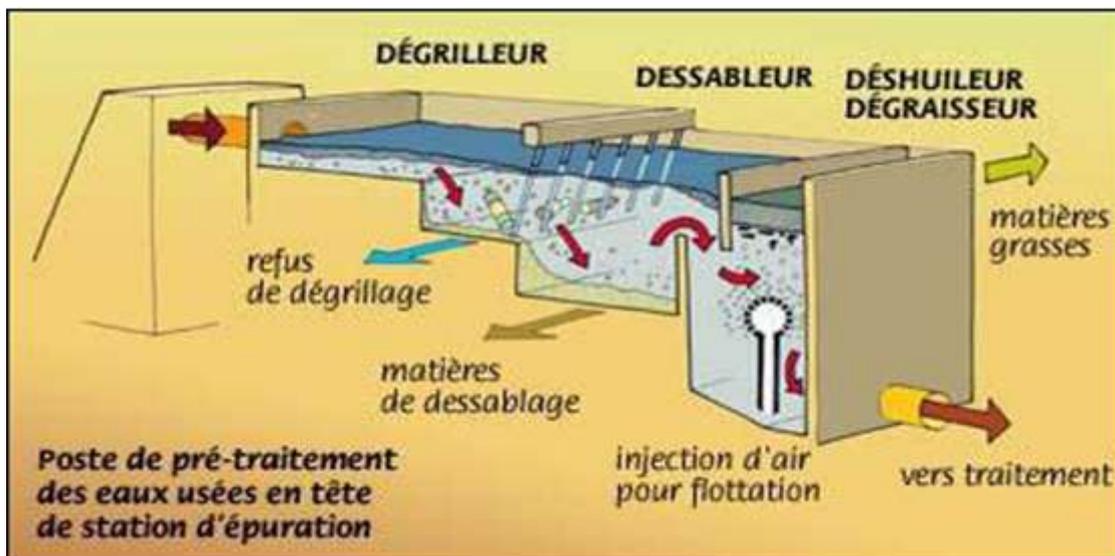


Figure 3 : Schéma d'un prétraitement d'une station d'épuration (**site 02, 2021**).

2.2. Le traitement primaire (traitement physico-chimique) :

Il s'agit le plus souvent d'une décantation qui permet d'éliminer les matières en suspension décantables en deux heures. Ce traitement permet essentiellement l'élimination de la pollution particulaire et d'une partie de la pollution organique sous forme particulaire. Cependant, cette élimination est insuffisante pour répondre aux nouvelles normes de rejet (arrêté du 22 décembre 1994) (**Rejsek, 2002**).

Durant cette phase, plus de la moitié de la pollution est éliminée. Les matières solides extraites sont sous forme de boues dites « boues primaires ». Le traitement fait appel à trois procédés physiques :

Chapitre 2 : Traitement des eaux usées

2.2.1. La décantation :

L'eau s'écoule à faible vitesse dans un grand bassin, appelé décanteur, au fond duquel se séparent les matières en suspension ou colloïdales du liquide par sédimentation (**Methnani, 2012**).

2.2.2. La flottation :

Permet d'éliminer les matières dont la masse volumique réelle ou apparente est inférieure à celle de l'eau (**Methnani, 2012**).

2.2.3. La filtration :

C'est le passage d'un mélange liquide-solide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les solides et laisse passer les liquides (**Methnani, 2012**).

2.3. Traitement secondaire (traitement biologique) :

Les enzymes, catalyseurs organiques sécrétés par les micro-organismes, sont, dans les processus aérobies ou anaérobies, à l'origine de la décomposition des substances organiques. Ainsi, on distingue les enzymes extracellulaires qui provoquent la destruction des structures moléculaires trop complexes pour pénétrer au sein de la cellule et les enzymes intracellulaires qui assurent l'assimilation et sont par conséquent, à l'origine de la prolifération des cellules (**Dhaouadi, 2008**).

Les différents procédés biologiques d'épuration sont :

- Les boues activées.
- Les lits bactériens.
- Le lagunage.
- La digestion anaérobie (**Dhaouadi, 2008**).

2.3.1. Le procédé à boues activées :

Le procédé de traitement par boues activées est un procédé de traitement biologique à culture en suspension. Il est constitué d'un réacteur biologique où les micro-organismes flottent librement dans un liquide aéré sous forme de petits agglomérats de 3-5 mm. Ces flocons de boues comprennent des microorganismes hétérotrophes et autotrophes nitrifiants lorsque le temps de séjour de la boue est suffisant pour que leur multiplication produise une biomasse active dans le traitement (**Amiri, 2020**).

Chapitre 2 : Traitement des eaux usées

Le substrat contenu dans les eaux usées sert de nourriture pour la multiplication et le développement des microorganismes contenus dans la biomasse. Ils y trouvent leur source de carbone, d'azote, de phosphore et d'oligoéléments. Dans le bassin d'aération, la fourniture en oxygène est assurée par des organes électromécaniques : aérateurs de surface (turbine ou brosse), ou par insufflation d'air (suppresseur plus diffuseurs immergés) (Amiri ,2020) (figure4).

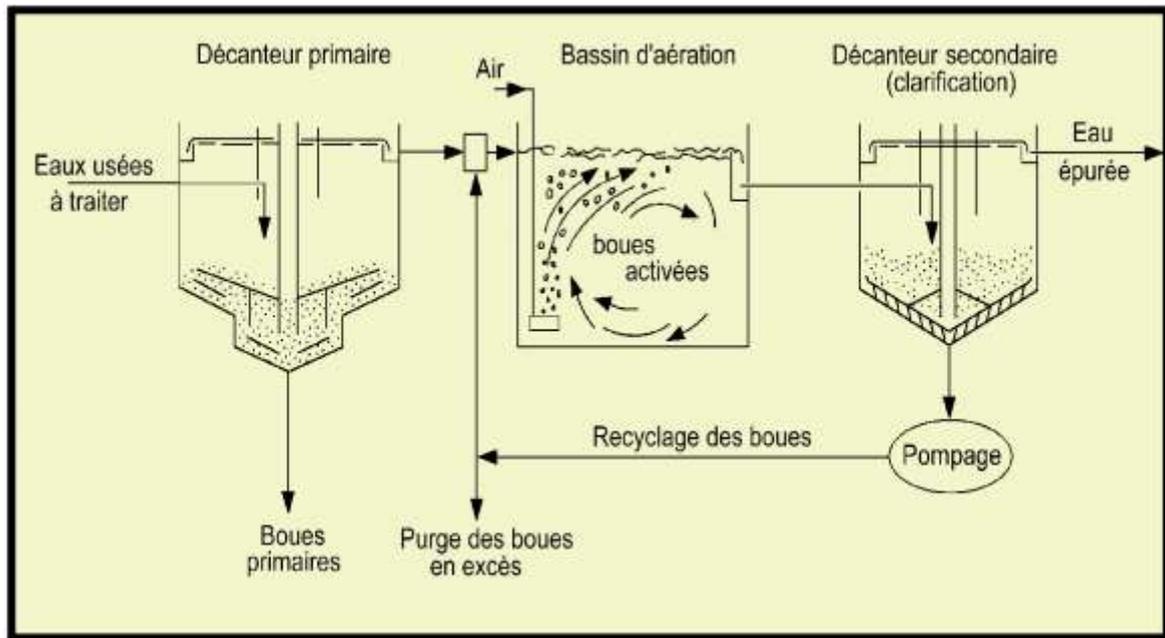


Figure 4: Procédé de traitement par boues activées (Yousra et Nadira, 2020).

2.3.2. Lit bactérien :

Dans ce procédé, l'eau est préalablement décantée, passe dans un dégrilleur puis introduite dans un ouvrage contenant une masse de matériaux (pouzzolane ou plastique) servant de support aux micro-organismes épurateurs qui y forment un film biologique qui assimile la pollution. La dispersion de l'eau à traiter en surface du lit est réalisée par un dispositif tournant en contre-réaction des jets d'eau. Une aération naturelle est réalisée grâce à des ouïes d'aération. Le film biologique se décroche au fur et à mesure que l'eau percole. En sortie du lit bactérien se trouve un mélange d'eau traitée et de biofilm. Ce dernier sera piégé dans le décanteur sous forme de boues et l'eau traitée rejoint le milieu naturel (figure 5). La recirculation des boues vers le décanteur digesteur est essentielle (Amiri, 2020).

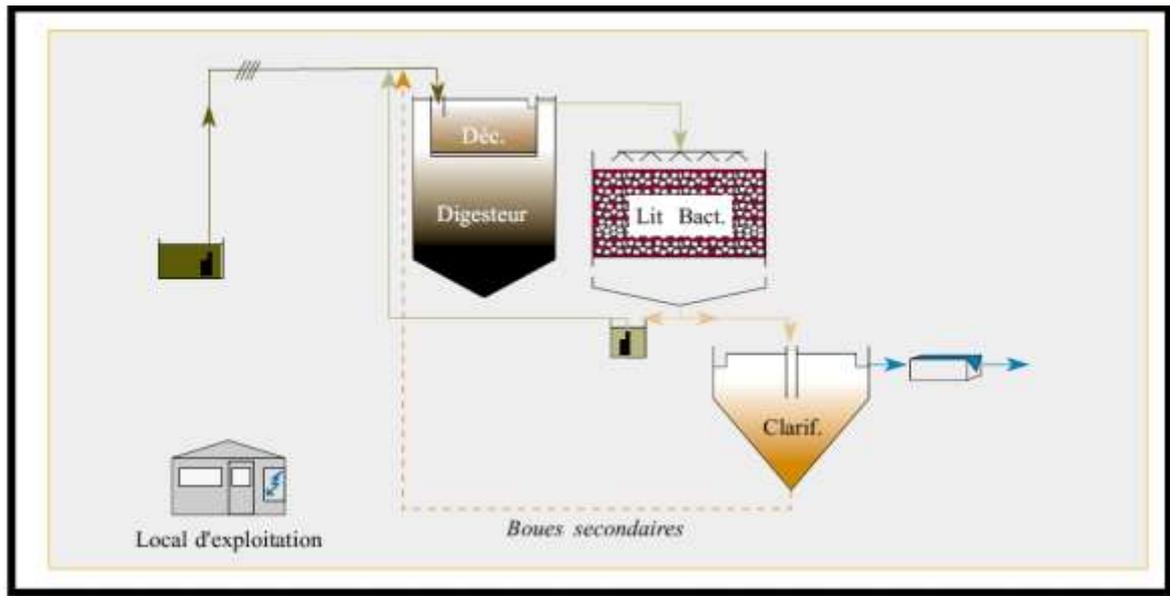


Figure 5 : Schéma de la filière lits bactériens (Yousra et Nadira, 2020).

2.3.3. Technique lagunaire :

Le lagunage est une technique extensive de traitement des eaux usées constituée de plusieurs bassins étanches en série où se développent les bactéries, algues et zooplancton. L'épuration de la matière repose sur l'activité de bactéries libres, essentiellement aérobies, qui utilisent l'oxygène provenant de la photosynthèse algale, et sur de longs temps de séjour et l'eau dans les bassins (figure 6).

Le lagunage s'appuie sur des processus naturels d'autoépuration et des conditions climatiques locales (ensoleillement, température) s'est développé de façon très diverse selon les pays (Amiri, 2020).

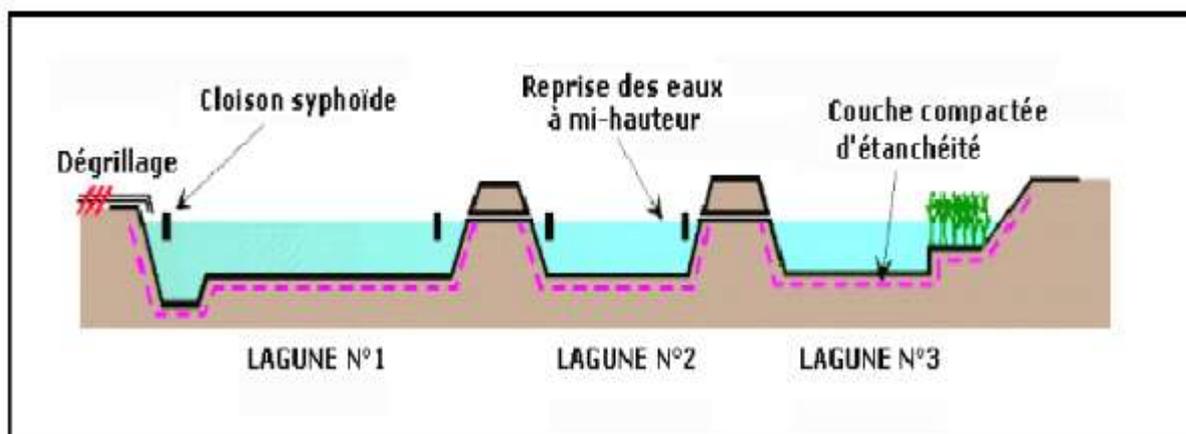


Figure 6 : Lagunage naturel (Yousra et Nadira, 2020).

Chapitre 2 : Traitement des eaux usées

2.3.4. La digestion anaérobie :

L'épuration biologique peut s'effectuer par voie aérobie ou anaérobie. Dans les deux cas sont des micro-organismes adaptés au procédé qui se multiplient en absorbant la pollution organique (bactéries hétérotrophes assimilant les matières organiques) (**Dhaouadi, 2008**).

- **Voie aérobie :**

Au cours de la croissance aérobie, l'énergie prélevée de la transformation du carbone organique, devient une énergie disponible pour la synthèse (**Dhaouadi, 2008**).

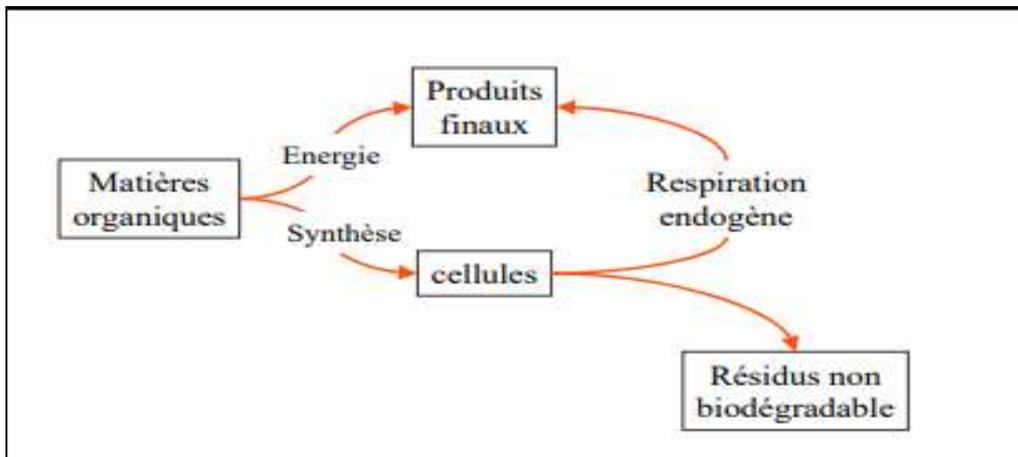


Figure 7 : Mécanisme de l'oxydation biologique aérobie (**Dhaouadi, 2008**).

- **Voie anaérobie :**

La conversion anaérobie des matières solides organiques en sous-produits inoffensifs est très complexe et résulte de multiples réactions comme cela est indiqué sur le schéma ci-dessous (**Dhaouadi, 2008**). Ce procédé repose sur les réactions de fermentation qui ont lieu dans des conditions d'anaérobiose et sont effectuées par une biomasse anaérobie complexe. De manière générale, on distingue trois étapes dans ce processus. Dans la phase de liquéfaction, des bactéries hydrolytiques solubilisent les matières complexes. Dans la deuxième étape, une population d'acidogénèse transforme les composés organiques en acides, qui serviront ultérieurement de nourriture à des bactéries méthanogènes. Au cours de l'étape finale les acides organiques sont transformés en méthane et gaz carbonique (**figure 8**).

Le métabolisme anaérobie libérant très peu d'énergie comparé au processus aérobie et provoque une faible production de boues. Nonobstant, l'épuration anaérobie est plus lente que l'épuration aérobie (**Grisales et Victor, 2007**).

Chapitre 2 : Traitement des eaux usées

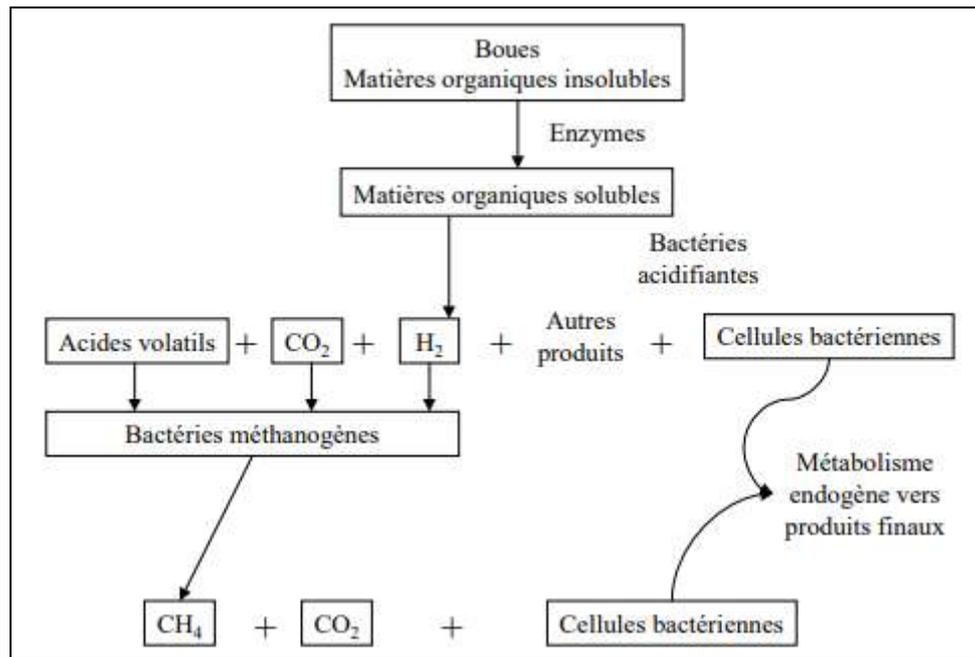


Figure 8 : Mécanisme de la digestion anaérobie des boues (Dhaouadi, 2008).

Les traitements aérobies sont les plus répandus, alors que les traitements anaérobies restent réservés aux cas de pollution fortement concentrée pour laquelle l'apport d'oxygène en quantité suffisante pose un problème (Dhaouadi, 2008).

2.4. Le traitement tertiaire :

Le traitement tertiaire, qui n'est pas systématique, est une opération d'affinage de l'effluent avant réintroduction de l'eau épurée dans le milieu naturel. Il permet d'éliminer les métaux, les composés organiques non-biodégradables ou les odeurs apparues durant le traitement secondaire afin de réutiliser les eaux épurées à des fins agricoles ou industrielles. Ces composés sont éliminés par des actions spécifiques de désinfection, neutralisation, stabilisation. Leur rendement est en général très satisfaisant puisque ces procédés permettent d'abattre de 75 à 95% de la DCO restante après le traitement secondaire, jusqu'à 97% des composés aromatiques et 98% de la couleur (Methnani, 2012).

Chapitre 3 :

**Les enzymes
dégradant les
polluants des eaux
usées**

Introduction :

Ces dernières années, divers polluants et à des niveaux alarmants ont été rejetés dans les milieux aquatiques. Comme la plus largement méthode de traitement des eaux usées employée, la boue activée traditionnelles peut éliminer efficacement la plupart des polluants tandis que les contaminants résistants comme l'huile, la graisse, les produits pharmaceutiques, les pesticides et les plastiques sont difficiles à être éradiqué. Les eaux usées contenant de l'huile et de la graisse sont généralement produites par les laiteries, les huileries, les abattoirs et les déchets alimentaires (**Feng et al. 2021**).

À l'heure actuelle, les méthodes de traitement des eaux usées comprennent principalement des méthodes physico-chimiques et biologiques. Les méthodes physicochimiques comme l'oxydation chimique, la distillation, les techniques de séparation par membrane et l'adsorption ont été utilisées pour le traitement des eaux usées.

Les méthodes biologiques sont plus respectueuses de l'environnement et pourraient éliminer la plupart des polluants des eaux usées. Ces méthodes employaient des plantes, microbes et enzymes pour le traitement des eaux usées (**Feng et al. 2021**).

1. Les enzymes dégradant les eaux usées :

1.1. Définition :

L'enzyme est un biocatalyseur efficace qui peut biodégrader les substances spécifiquement dans des conditions douces. Les enzymes ont des sites actifs spécifiques, capables de se lier avec des substrats spécifiques et réduire l'énergie d'activation au cours des processus enzymatiques. Ainsi, ces processus ont une forte cinétiques et spécificité de la réaction. De plus, les enzymes peuvent minimiser le temps nécessaire au transport des substrats dans les cellules, ce qui rend ces derniers processus plus efficaces. (**Feng et al. 2021**).

Il existe six classes d'enzymes et les plus utilisées dans le traitement des eaux usées sont les hydrolases et les oxydoréductases. Ces deux classes d'enzymes peuvent biocatalyser la plupart des polluants dans les eaux usées en raison de leur large éventail de substrats. À l'heure actuelle, des enzymes comme la lipase, la laccase, la peroxydase ont été utilisées commercialement (**Feng et al. 2021**).

2. Traitement enzymatique dans différents polluants des eaux usées :

2.1. Sélection d'enzymes :

L'efficacité enzymatique dans le traitement des eaux usées dépend fortement des types d'enzymes et leurs sources. D'une part, les enzymes ne peuvent catalyser qu'un type de réaction en raison de leur spécificité. Par exemple, les lipases catalysent la dégradation de l'huile, de la graisse, tandis que la protéase est capable de décomposer les protéines. (Feng et al., 2021).

2.2. Dégradation assistée par LiP des polluants dangereux :

La Lignine peroxydase (1,2-bis (3,4-diméthoxyphényl) propane-1,3-diol) ou peroxyde d'hydrogène oxydoréductase : EC(1.11.1.14) symbolisée par **LiP** réalise le clivage/dépolymérisation oxydative de la lignine en présence de peroxyde d'hydrogène. Pour la première fois, LiP a été extraite du bouillon de culture d'un champignon ligninolytique *Phanerochaete chrysosporium*, mais maintenant ces enzymes se trouvent dans de nombreux micro-organismes, en particulier les *basidiomycètes* à pourriture blanche (Bilal et al., 2019).

En raison de la faible spécificité du substrat avec un potentiel redox élevé et non spécifique, libre et supporté par un porteur, les LiP se caractérisent par une capacité distincte à oxyder une large gamme de composés aromatiques phénoliques et non phénoliques, ainsi que de nombreux autres produits chimiques organiques tels que les xénobiotiques (Bilal et al., 2019) (Figure 9 et 10).

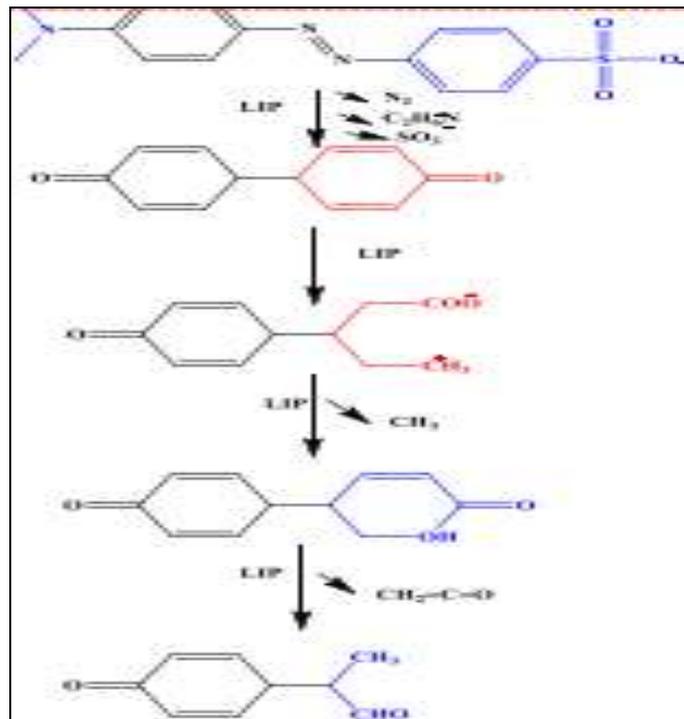


Figure 9 : Une voie de dégradation schématique de l'orange de méthyle, en tant que colorant modèle, en présence de LiP en tant que nouvel agent catalyseur (Bilal et al., 2019).

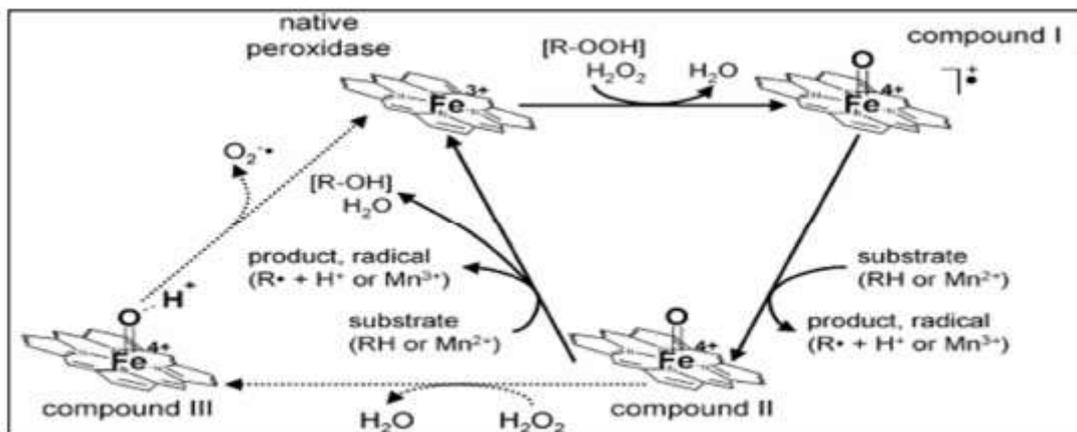


Figure 10 : Mécanisme catalytique de la LiP (Diakité, 2016).

2.3. Dégradation assistée par MnP des polluants dangereux :

Les manganèse peroxydases (Mn(II) : hydrogène-peroxyde oxydoréductase) : EC (1.11.1.13), appartenant au groupe des oxydoréductases, sont des enzymes contenant de l'hème glycosylé avec une perspective biotechnologique profonde. MnP a d'abord été découvert dans l'extrait de culture de *Phanerochaete chrysosporium*, mais maintenant cette

enzyme est également identifiée dans de nombreuses pourritures blanches, champignons (WRF) et bactéries (Bilal et al., 2019).

La catalyse par MnP est dépendante du manganèse, avec Mn^{2+} comme substrat préféré qui peut s'oxyder pour former Mn^{3+} . Chélaté, Mn^{3+} peut alors jouer le rôle de médiateur de transfert de charge diffusible, permettant ainsi l'oxydation de divers substrats phénoliques y compris les phénols simples, les colorants synthétiques et les composés de lignine phénoliques modèles) (Figure 11). La MnP possède également la capacité d'oxyder ou cliver les structures non phénoliques avec l'aide de différents médiateurs dont les radicaux thiole ou lipidique (Zhuo et Fan, 2021).

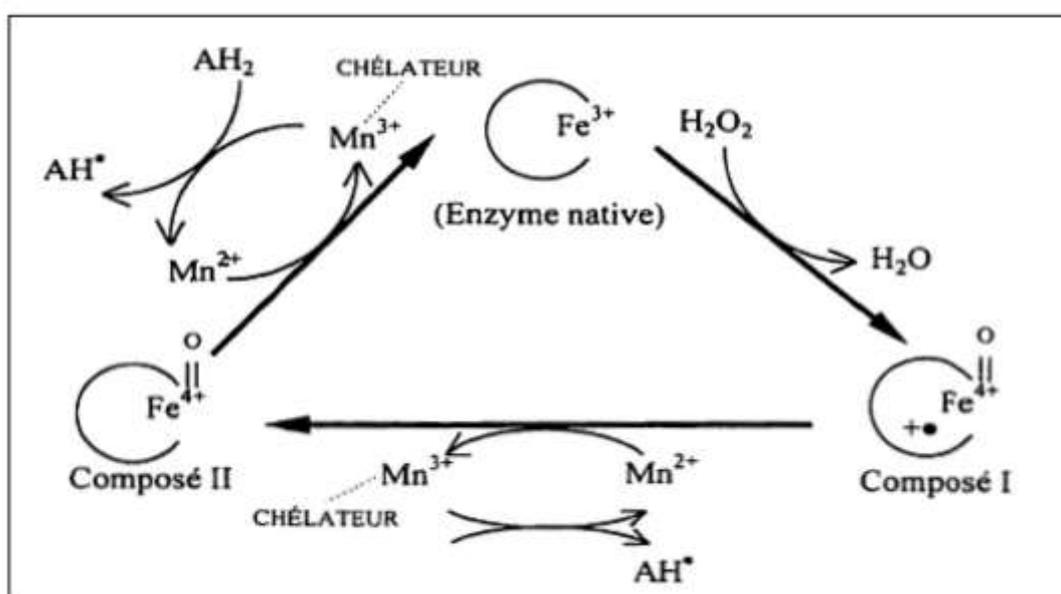


Figure 11 : Mécanisme catalytique de la MnP (Diakité, 2016).

2.4. Dégradation assistée par la peroxydase polyvalente :

La peroxydase polyvalente (VP) est une peroxydase ligninolytique contenant de l'hème avec une architecture moléculaire hybride qui combine les fonctionnalités de la MnP et la LiP.

Autrement dit, la VP combine les propriétés catalytiques des deux MnP (c'est-à-dire l'oxydation des substrats phénoliques en oxydant Mn^{2+} en Mn^{3+}) et LiP (c'est-à-dire l'oxydation des composés aromatiques non phénoliques). Ainsi, la polyvalence catalytique du VP permet son application dans les réactions médiées par Mn^{3+} ou indépendantes du Mn pour des substrats aromatiques, à potentiel redox faible ou élevé ce qui le rend également utile pour la catalyse de divers polluants organiques (Zhuo et Fan, 2021).

2.5. Dégradation assistée par la des peroxydases décolorantes:

Les peroxydases décolorantes (DyP) appartiennent à la classe des peroxydases fongiques. Elles ont été découvertes, pour la première fois, au WRF comme *Bjerkandera adusta* en 1999 et nommés en fonction de leur capacité à dégrader une large gamme de composés colorants. Des membres supplémentaires du DyP ont ensuite été trouvés dans les protéomes d'autres champignons ainsi que dans plusieurs espèces bactériennes). (**Zhuo et Fan, 2021**).

Ces enzymes ont des structures protéiques uniques et des séquences d'acides aminés distinctes, tout en présentant une préférence substrat pour les colorants anthraquinoniques et une activité peroxydase élevée vis-à-vis une variété de composés organiques. Les fonctions physiologiques des DyP sont encore inconnues, mais leurs propriétés biotechnologiques potentielles ont attiré une attention considérable pour leur application dans l'environnement. De plus, la DyP peut également dégrader des pigments naturels comme le β -carotène, la bixine et le rocou et plusieurs colorants à potentiel redox élevé tels que Reactive Blue 5, et Azure B, ainsi que le substrat phénolique 2,6-diméthoxyphénol. (**Zhuo et Fan, 2021**).

2.6. Dégradation assistée par HRP :

Les enzymes extraites et récupérées des racines de raifort ont également été utilisées à des fins de nettoyage de l'environnement. Parmi une variété d'isoenzymes de peroxydase distinctes trouvées dans la nature, la peroxydase C de raifort (HRP : EC 1.11.1.7) est considérée comme l'enzyme la plus abondante. HRP est une enzyme contenant de l'hème qui catalyse l'oxydation des acides phénoliques, des phénols aromatiques (bisphénols, pyrogallol) et des amines non aromatiques (c'est-à-dire indoles, 4-aminoantipyrine, etc.) à l'aide de peroxyde d'hydrogène (**Bilal et al., 2019**).

Les applications notables des HRP incluent la protection de l'environnement, la dégradation des eaux usées contenant des phénols et la transformation de composés toxiques tels que les xénobiotiques, les colorants, les produits pharmaceutiques et autres contaminants dangereux à partir de l'eau potable et les effluents industriels (**Figure12 et 13**).

La présence de composés phénoliques comme polluants dangereux dans les eaux usées issues de diverses industries telles que textile, chimique, médicale, papier et pharmaceutique est devenu un environnement émergent et préoccupation de nos jours et ravive donc beaucoup d'attention. (**Bilal et al., 2019**).

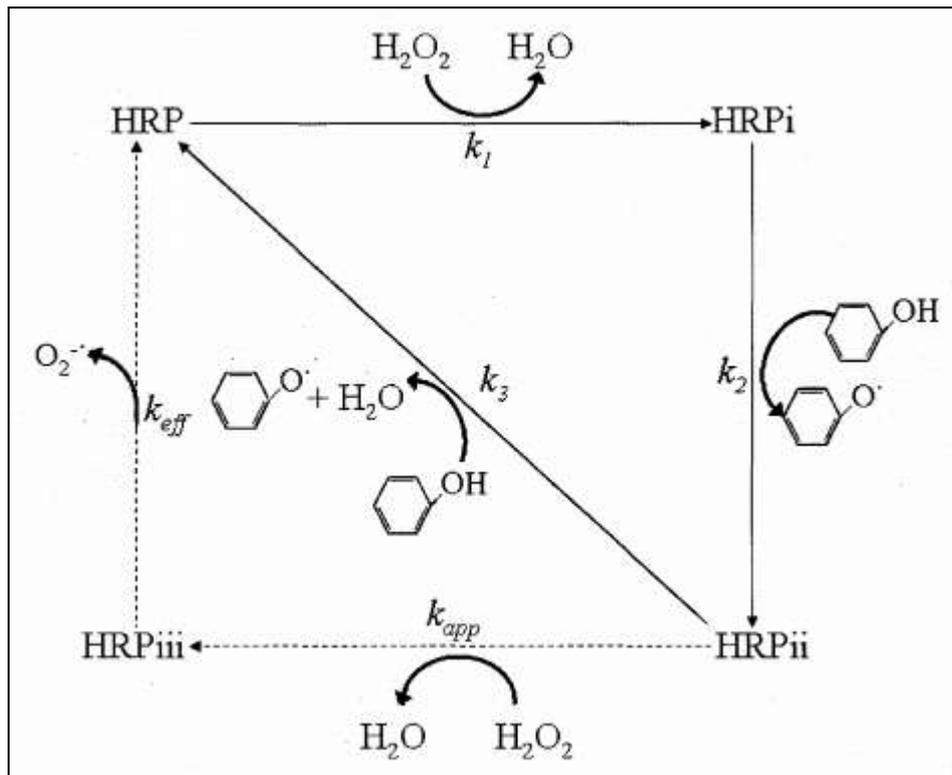


Figure 12 : Inactivation de l'enzyme HRP par H_2O_2 , pouvant se produire durant un cycle catalytique (composé aromatique considéré : le phénol) (Auriol, 2007).

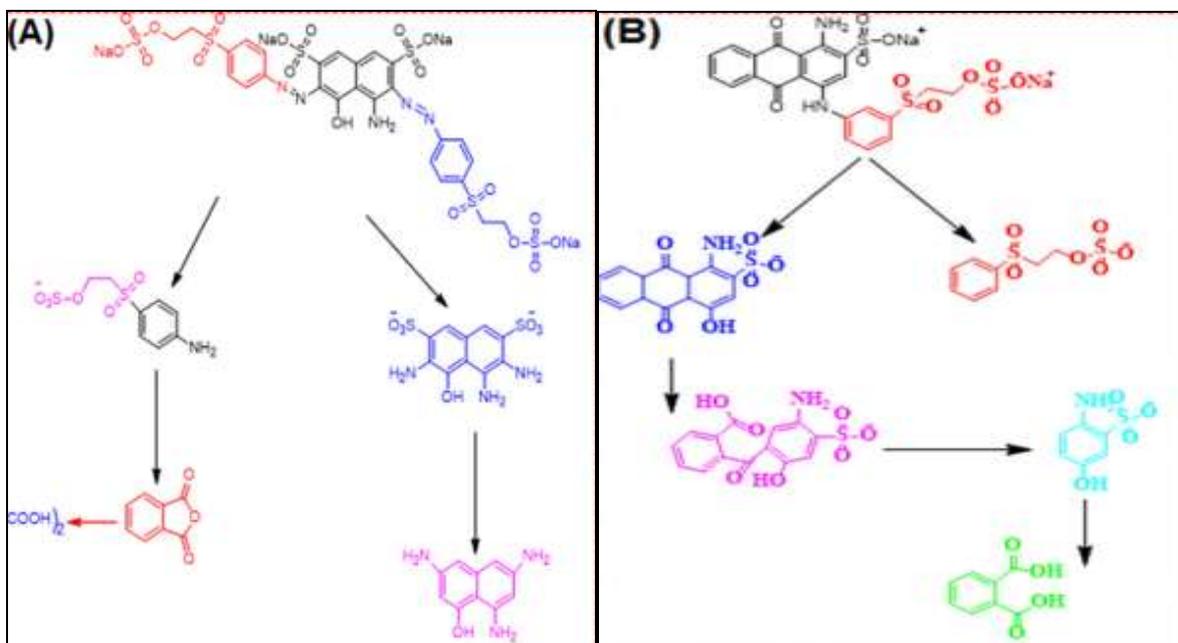


Figure 13 : Voies catalytiques assistées par la peroxydase : (A) RB-5 et (B) RB-19 (Bilal et al., 2019).

2.7. Dégradation assistée par laccases des polluants dangereux :

Les laccases (p-diphénol dioxygène oxydoréductases : EC 1.10.3.2) sont des oxydoréductases extracellulaires avec une existence abondante dans les bactéries et les plantes. Néanmoins, les laccases provenant de sources fongiques telles que *Trametes versicolor*, *T. vilosa* ou *Cerrenauni colore* sont d'un grand intérêt à cause de leur haute performance catalytique, leur rentabilité et leur abondante disponibilité. (Bilal et al., 2019).

En raison de leur faible spécificité de substrat, ces enzymes peuvent catalyser une grande variété de réactions, en particulier l'oxydation par un électron des monophénols, des diphénols et des polyphénols comme amines aromatiques, diamines, N-hétérocycles, phénothiazines, etc. Les processus d'oxydation induits par les laccases génèrent des radicaux phénoxy réactifs avec une réduction simultanée de l'oxygène en eau, ce qui évite le besoin pour H_2O_2 . (Bilal et al., 2019).

Structurellement, les laccases sont une classe d'enzymes multicuivre contenant quatre ions cuivre dans leur structure aux propriétés différentes. Ils ont d'énormes applications dans les secteurs industriels du textile, de l'alimentation, des carburants et pharmaceutiques (Figure 14).

Concernant les caractéristiques, les propriétés omniprésentes et large spécificité de substrat font en sorte que les laccases agissent sur une grande variété de composés phénoliques et sont donc de plus en plus appliquées comme approche d'assainissement plus durable pour dégrader les contaminants liés à l'environnement de l'eau et du sol. Ces enzymes ne nécessitent pas de cofacteurs coûteux et utilisent seulement l'oxygène moléculaire comme co-substrat pour la catalyse, ce qui présente des économies de coûts significatives par rapport aux autres peroxydases. (Bilal et al., 2019).

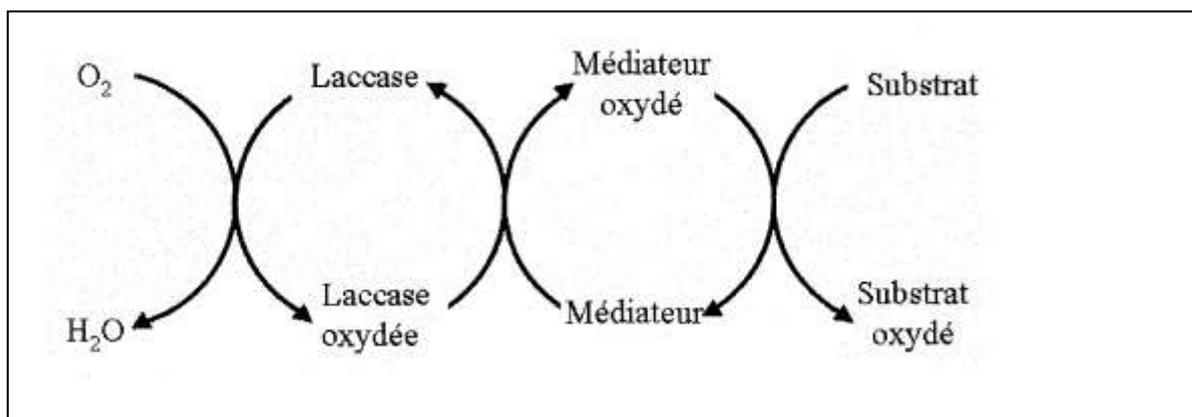


Figure 14 : Cycle catalytique simplifié du système laccase-méiateur (Auriol, 2007).

2.8. Dégradation assistée par les tyrosinases des polluants dangereux :

Les tyrosinases (o-diphénol oxydoréductases oxygénées : EC 1.14.18.1) sont des enzymes contenant du cuivre, largement répandues dans la nature et se trouvent dans les bactéries, les champignons, les insectes, les plantes et les mammifères. Ces enzymes jouent un rôle important dans la synthèse de mélanine et d'autres pigments à partir de l'oxydation de la tyrosine. **(Bilal et al., 2019).**

Mécaniquement, les tyrosinases sont différentes des laccases dans leur catalyse de l'oxydation des composés phénoliques et de leurs dérivés et par conséquent génèrent des quinones correspondantes à celle de radicaux libre et molécules d'eau comme sous-produit. Néanmoins, à l'instar des laccases, les tyrosinases présentent un grand potentiel pour catalyser la biotransformation de nombreux composés tels que le phénol, les monophénols et leurs dérivés multisubstitués, c'est-à-dire les bisphénols, chloro- et nitrophénols en raison de leur plus grande spécificité de substrat. **(Bilal et al., 2019).**

3. Performance de la biodégradation enzymatique des polluants des eaux usées :

3.1. Biodégradation des huiles et graisses

La croissance incontrôlée de la population mondiale et sa demande alimentaire et des ressources a conduit à d'énormes quantités de viande et d'huile comestible, mais aussi dans la façon dont il est gaspillé. Un rapport a montré que le marché mondial du pétrole valait 83,4 milliards de dollars en 2015, et il passerait à 130,3 milliards de dollars en 2024. Environ 203,8 millions de tonnes d'huiles végétales comestibles ont été produits en 2018, avec une consommation de 197,3 millions de tonnes. Aussi, la production animale, l'abattoir la production de viande a connu une augmentation fulgurante au cours des dernières décennies. Les industries florissantes de la viande et de l'huile comestible ont généré une énorme quantité des eaux usées. Ces eaux usées contenant des huiles et des graisses ont une forte charge organique et inorganique qui est nocive pour les milieux aquatiques même les eaux de surface en cas de sortie sans traitement efficace et simplement ajoutées à la pollution mondiale **(Feng et al., 2021).**

Les lipases, qui sont utilisées commercialement, sont les enzymes les plus employées dans le traitement des eaux usées contenant des huiles et des graisses car elles peuvent les décomposer en acides gras libres plus simples et en glycérol. Les bonnes performances de l'hydrolyse de l'huile et la graisse par les lipases a été signalée, par exemple une lipase commerciale a été utilisée pour la décomposition des déchets gras flottants des industries agroalimentaires laitières et carnées. Les résultats ont montré que cette lipase commerciale peut favoriser la libération d'acides gras à longue chaîne, en particulier d'acides insaturés

lorsque le pH initial est ajusté à 7,0. La lipase extracellulaire produite par *Candida rugosa* peut éliminer 93 % de triglycérides de d'huile de palme dans les eaux usées après 48 heures .Cependant, l'hydrolyse par la lipase des huiles et des graisses doit être considérée comme une méthode de prétraitement puisque les produits de transformation de la lipase sont simples acides gras et glycérol. Ces processus enzymatiques doivent encore être combinés avec d'autres méthodes telles que boues activées ou fermentation anaérobie pour compléter le traitement. (Feng et al., 2021).

3.2. Biodégradation des médicaments :

Les produits pharmaceutiques constituent des micropolluants organiques courant dans le milieu aquatique et ont été détectés au cours des dernières décennies.

Avec l'utilisation intensive de produits pharmaceutiques, plus de 200 différents composés actifs pharmaceutiques ont été signalés dans le plan d'eau. Anti-infectieux, agents cardiovasculaires, agents du système nerveux central, les agents métaboliques, les hormones, et d'autres produits pharmaceutiques courent dans les eaux usées. Maintenant, l'élimination des produits pharmaceutiques par les systèmes conventionnels à boues activées est insuffisante. (Feng et al., 2021).

Un rapport a montré que seuls 4 des 35 produits pharmaceutiques ont atteint plus de 90 % d'élimination en utilisant des boues d'épuration activées provenant de usines de traitement des eaux usées municipales, alors que moins de 50 % d'élimination de 17 composés a été observé. Un autre rapporta montré que les installations de traitement des eaux usées ne pouvaient éliminer que 20 à 90 % des résidus d'antibiotiques passivement. En fait, des antibiotiques comme céphalosporines, tétracyclines et fluoroquinolones sont difficiles à dégrader naturellement. Plusieurs résidus de produits pharmaceutiques se trouvent dans les eaux usées traitées et sont constamment rejetés dans le milieu aquatique. Ils ont été détectée dans les eaux de surface, souterraines et même potables. Malgré les faibles concentrations de produits pharmaceutiques dans les eaux usées rejetées, leur bioaccumulation est au mieux minimale. Jusqu'à 6,5, 0,52 et 0,71 mg/L de ciprofloxacine, de norfloxacine et d'oxytétracycline respectivement ont été observés dans les écosystèmes d'eau douce. L'écotoxicité de certains produits pharmaceutiques a été rapportée, mais l'effet de la plupart d'entre eux en milieu aquatique est largement inconnue. L'inefficacité dans le traitement insuffisant des produits pharmaceutiques représentent une grande menace pour les milieux aquatiques en raison de leur bioaccumulation et de leur potentiel écotoxicologique. (Feng et al., 2021).

Certains chercheurs ont signalé la faisabilité de procédés enzymatiques pour le traitement des eaux usées contenant des produits pharmaceutiques, et les oxydoréductases

sont des enzymes efficaces pour éliminer ces produits. Par exemple, la chloroperoxydase immobilisée (CPO) a été utilisée pour le traitement des eaux usées qui renferment les antibiotiques lévofloxacine et rifaximine. Il convient de noter que le processus enzymatique peut causer une pollution supplémentaire puisque les produits pharmaceutiques seront transformés en sous-produits toxiques. (Feng et al., 2021).

Malheureusement, environ 3000 substances différentes ont été utilisées comme ingrédients pharmaceutiques et on en sait moins sur les effets environnementaux de la plupart des produits pharmaceutiques puisque leurs voies de biodégradation sont complexes et mal comprises. Les structures complexes des produits pharmaceutiques entrave l'application du traitement des eaux usées à base d'enzymes. (Feng et al., 2021).

Par conséquent, plus d'études sur les mécanismes et les voies de transformation des produits pharmaceutiques à base d'enzymes sont nécessaire (Feng et al., 2021).

3.3. Biodégradation des pesticides :

Le caractère répandu des pesticides menace grandement les écosystèmes aquatiques et la santé humaine en raison de leur forte utilisation, gaspillage et taux de résidus élevé. Les pesticides sont hautement toxiques et leurs résidus prendront fin dans les plans d'eau par ruissellement et percolation. Ils ont un impact sur la qualité de l'eau, sur le métabolisme, la régulation et les processus biochimiques des organismes aquatiques donc perturbent l'équilibre des écosystèmes aquatiques. (Feng et al., 2021).

Actuellement, les pesticides organophosphorés et carbamates sont les pesticides les plus couramment utilisés et ils corrompent l'environnement et la santé animale car ils peuvent agir comme inhibiteurs de la cholinestérase. D'autres toxicités qui ne sont pas liés à la cholinestérase, mais dont l'issue mettait en jeu le pronostic vital observé. L'utilisation de certains pesticides hautement toxiques tels que le triazophos, le méthamidophos et le carbofuran sont restreints mais ils sont toujours en forte demande, notamment dans les pays en développement. (Feng et al., 2021).

Les enzymes clés dans la décomposition des pesticides ont également été signalées. Par exemple, la laccase immobilisée sur des nanoparticules de fer magnétique a montré plus de 99% d'élimination du chlorpyrifos en 12 heures à pH 7. D'autres enzymes comme l'anhydrolase acide organophosphorée (OPAA) et les hydrolases organophosphorées (Ophs) peuvent décontaminer les pesticides. Ainsi que la dégradation des pesticides à base de monoenzymes, la synergie de plusieurs enzymes pourrait également donner un bon résultat. Dans une réaction à double enzyme pour la décomposition du chlorure d'acétylcholine,

l'acétylcholinestérase pourrait transformer le chlorure d'acétylcholine (Ach) en choline, tandis que la choline est encore décomposée par la choline oxydase (CHO) en bétaine et en peroxyde d'hydrogène. Puisque de nombreux traitement monoenzymatiques des pesticides ne sont pas respectueux de l'environnement, la combinant de plusieurs enzymes sera un bon moyen d'obtenir un effet enzymatique inoffensif (Feng et al., 2021).

3.4. Biodégradation des produits de soins personnels :

Dans le monde d'aujourd'hui, les produits de soins personnels (PCP) sont largement utilisés dont les shampooings, les crèmes, les crèmes solaires, les détergents et les filtres UV qui sont tous PCP typiques dans la vie de millions de personnes. (Feng et al., 2021).

Ces PCP pénètrent dans le milieu aquatique directement et indirectement. D'une part, les PCP entrent directement dans le milieu aquatique par des activités récréatives comme la natation et la baignade à l'extérieur. A l'inverse, l'insuffisance de l'élimination de ces contaminants par les stations d'épuration et les activités humaines comme la douche, le nettoyage, le blanchiment entraînent un apport indirect de PCP. (Feng et al., 2021).

En fait, le triclosan (TCS), filtres UV comme l'octocrylène, benzophénone-3 et oxybenzone sont couramment utilisés comme composés organiques dans les PCP qui sont toxiques. Il a été rapporté qu'un extrait enzymatique extracellulaire (principalement laccase) de *Trametes versicolor* (ATCC 7731) pourrait dégrader efficacement l'oxybenzone en présence d'un médiateur redox. La laccase du champignon de la pourriture blanche *Coriolopsis polyzona* combiné avec le médiateur 2,2'-azino-bis (acide 3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique (ABTS) pourrait éliminer efficacement le TCS après une heure de traitement dans les conditions de 40 °C et pH 4. Malgré le grand potentiel du traitement des PCP à base d'enzymes, d'autres études sont nécessaires car les résultats dans ce domaine sont encore rares (Feng et al., 2021).

3.5. Biodégradation des produits chimiques industriels :

3.5.1. Phénols et composés phénoliques :

En tant que matériau important dans l'industrie, les phénols et les composés phénoliques jouent un rôle important dans l'industrie du textile, papier, plastique, produits pharmaceutique et autres. Ces composés mettent en danger l'homme et les organismes aquatiques entraînant une grande menace pour l'environnement, même à faible concentration (Feng et al., 2021).

À l'heure actuelle, l'élimination à base d'enzymes du phénol et des composés phénoliques a été étudiée. En fait, l'élimination complète de 0,4 mM de phénol a été obtenue par une laccase immobilisée après 40 min de traitement sous les conditions de 35 °C et pH 4,5. Les peroxydases sont aussi des enzymes efficaces dans la transformation des composés phénoliques puisque leurs sites actifs, qui renferment le cofacteur hème et la sélénocystéine activée, sont d'accès faciles. Une recherche a montré que les peroxydases immobilisées pouvaient éliminer 99,9 % du phénol à 1 mM après 5 heures de traitement dans les conditions de température ambiante et pH 7,0. De même, pour une poudre de tégument de graines de soja immobilisée en tant que peroxydase de soja pour l'élimination de phénol provenant d'eaux usées de raffinerie dans un bioréacteur à lit fixe. (Feng et al., 2021).

Jusqu'à 97% d'élimination du phénol a été observée dans les meilleures conditions possibles, étant 1 mM comme concentration initiale de phénol, 56, 14 mM de concentration de peroxyde d'hydrogène et un débit de 5,5 ml/min (Feng et al., 2021).

3.5.2. Les teintures :

Avec l'essor des industries du textile et de l'habillement, de plus en plus d'eaux usées contenant des colorants sont produits en raison de l'utilisation des teintures et leur fixation sur le tissu. Les industries de l'imprimerie, du cuir et du plastique sont également des sources de production d'eaux usées contenant des colorants. Les structures de la plupart des colorants sont complexes et ont une stabilité caractéristique élevée qui résiste naturellement à la biodégradation. Les colorants synthétiques peuvent affecter la chaîne alimentaire et ces composés peuvent être transformés en produits nocifs, constituant une grande menace pour l'environnement aquatique et les organismes qui y vivent. (Feng et al., 2021).

À présent, le traitement des colorants à base d'enzymes est principalement divisé en biodégradation, décoloration et détoxification. Les oxydoréductases sont les enzymes les plus utilisées pour le traitement des effluents qui contiennent des colorants. La peroxydase de raifort immobilisée sur un gel de polyacrylamide ou réticulée a montré une efficacité dans la dégradation du colorant azoïque méthyl orange et a donné une dégradation maximale du méthyl orange (93,5%) à pH 6. En outre, la laccase peut éliminer efficacement deux sulfamides en présence de 1-hydroxybenzotriazole (HBT) comme médiateur. Une toxicité significativement diminuée de la solution de sulfonamide traitée à la laccase a également été observée selon une étude de microtoxicité par l'inhibition de la croissance bactérienne. (Feng et al., 2021).

Cependant, des recherches utilisant de vraies eaux usées contenant des colorants sont nécessaires puisque presque toutes les expériences menées étaient conduites dans des laboratoires avec des eaux usées synthétiques, ce qui n'est pas propice aux applications réelles (Feng et al., 2021).

3.5.3. Plastiques :

Les plastiques sont répandus dans notre vie et en particulier dans l'emballage qui crée beaucoup de commodité mais aussi un produit qui ne peut pas être décomposé. Le polyéthylène (PE), le polyamide (PA), le polyéthylène téréphtalate (PET), le polystyrène (PS), le polychlorure de vinyle (PVC), les polyuréthanes (PUR) et le polypropylène (PP) sont des plastiques couramment utilisés. Cependant, les plastiques comme l'éthylène et le propylène sont dérivés d'hydrocarbures fossiles qui résistent à la biodégradation. (Feng et al., 2021).

Ainsi, ils s'accumuleront plutôt que de se décomposer dans l'environnement. La production généralisée de matières plastiques et leur faible taux de recyclage aggrave également la situation. En 2015, plus de 6,3 milliards de tonnes de plastiques ont été générés et seulement 9 % ont été recyclés. Les plastiques résiduels endommagent considérablement l'environnement en raison de leurs caractéristiques de toxicité et d'accumulation. Les plastiques sont répandus dans les milieux aquatiques et surtout dans les océans du monde et même dans l'eau potable. (Feng et al., 2021).

Bien que les plastiques soient résistants à la biodégradation, des enzymes impliquées dans leur décomposition comme la PET hydrolase, la tannase et la MHETase ont été trouvées. Malheureusement, l'efficacité de la dégradation enzymatique des plastiques est faible. Il faudra des semaines pour hydrolyser complètement le PET par PETase à partir d'*Ideonalla sakaiensi* (IsPETase), qui est une dépolymérase efficace et spécifique. Récemment, des études portant sur l'augmentation de la thermostabilité et l'activité enzymatique de la PETase à rapporté un grand succès. À l'heure actuelle, les enzymes impliquées dans la dégradation de l'AP et la PET ont été enregistrées alors que l'on en savait moins sur les enzymes hydrolases de PVC, de PP, de PE et de PUR. Cependant, la dégradation de ces plastiques est possible par certaines enzymes car de nombreux microbes qui peuvent dégrader les plastiques ont été trouvées. La dégradation des plastiques à base d'enzymes est faisable et prometteuse mais d'autres recherches comme l'augmentation de la diversité enzymatique et son efficacité est

nécessaire pour l'application efficace dans le traitement des eaux usées qui contiennent les plastiques (Feng et al., 2021).

4. les systèmes de traitement des eaux usées liés aux enzymes :

4.1. Systèmes enzymatiques libres :

Dans ces systèmes, les enzymes peuvent être divisées en enzymes brutes et des enzymes purifiées. Les deux types d'enzymes ont donné de bons résultats dans l'élimination des polluants. Cependant, les enzymes purifiées sont chères car des méthodes comme la séparation par membrane, la chromatographie d'exclusion stérique et la chromatographie sur colonne sont nécessaires pour la purification enzymatique. Les enzymes purifiées étaient moins efficaces pour éliminer les polluants des eaux usées que les enzymes brutes dans certains cas puisque les enzymes brutes contiennent des médiateurs (Feng et al., 2021).

Il a été rapporté que la laccase brute extraite de *Tramete sversicolor* peut éliminer complètement le naproxène (NPX) alors qu'une élimination de 60 % a été obtenue par une laccase commerciale extraite de *Myceliophthora thermophila*. Cependant, cela ne signifie pas que les enzymes brutes sont meilleures que les enzymes purifiées. Étant donné que les enzymes sont chères, la forte demande d'enzymes qui ne peuvent pas être recyclées dans le traitement des eaux usées rend ces systèmes non réalisables et les enzymes restantes doivent être éliminées à la fin du traitement. Beaucoup d'études doivent être faites pour résoudre le coût et/ou les problèmes de contamination en cas d'utilisation d'enzymes libres pour le traitement des eaux usées (Feng et al., 2021).

4.2. Les systèmes enzymatiques immobilisés :

Les enzymes immobilisées sont souvent utilisées et étudiées dans les systèmes enzymatiques. Dans ces systèmes, les enzymes sont combinées physiquement ou attachées à diverses matrices, et les capacités de catalyse des enzymes sont maintenues en même temps. Puisque les enzymes sont attachées à la matrice, ces systèmes sont faciles à contrôler car les enzymes peuvent facilement se séparer avec eaux usées. De plus, les enzymes immobilisées peuvent être réutilisées plusieurs fois, ce qui diminue davantage la pollution et réduit considérablement le coût du traitement. (Feng et al., 2021).

Néanmoins, l'immobilisation réduit la perte d'activité de l'enzyme, prolonge sa durée de vie et améliore sa résistance au pH et à la température plutôt que des enzymes libres. Il faut savoir que dans ces systèmes, les méthodes d'immobilisation et les matériaux de support sont

d'une grande importance pour le coût des processus, activité et la cinétique enzymatique et l'efficacité du traitement. (Feng et al., 2021).

Les méthodes d'immobilisation généralement utilisées comprennent l'adsorption, inclusion, attachement covalent et réticulation. Ces méthodes d'immobilisation peuvent être divisées en méthodes physiques et chimiques. En général, l'immobilisation chimique offre une bonne stabilité enzymatique mais diminuera l'activité enzymatique car les liaisons covalentes formées entre l'enzyme et les matériaux de support perturbent la structure native de l'enzyme alors que les méthodes d'immobilisation physique d'inclusion ont moins d'influence sur la structure enzymatique mais présentent, néanmoins une faible stabilité enzymatique. Cependant, ce constat n'est pas absolu. Ainsi, dans les méthodes physiques, la stabilité enzymatique est améliorée en modifiant la surface des supports. Par exemple, un nanobiochar qui a été traité par H_2SO_4/HNO_3 (50/50, v/v) a été utilisé comme support pour l'immobilisation de laccase. (Feng et al., 2021).

Ce ci à entraîné une amélioration de la stabilité opérationnelle, vis-à-vis le pH et de stockage de la laccase immobilisée par rapport au laccase libre. Bien que les méthodes physiques sont moins d'influence sur l'activité enzymatique, la perte d'activité enzymatique ne doit pas être ignorée. Il a été rapporté que 30 à 40 % d'activité enzymatique seront perdues en 3 cycles de réaction. (Feng et al., 2021).

Quant au processus d'immobilisation chimique, les méthodes sont plus complexes que les méthodes physiques puisqu'elles sont liées aux réactions chimiques. Ces méthodes d'immobilisation peuvent affecter la performance du processus enzymatique. Il a été rapporté que deux peroxydases immobilisées ont eu des effets différents sur l'élimination du phénol sous les mêmes conditions. Les méthodes d'immobilisation doivent être déterminées par l'application demandée. Au cours les processus d'immobilisation, la toxicité des réactifs doit être prise en considération pour éviter les problèmes environnementaux. Le coût des matériaux, la toxicité, la surface et la résistance mécanique sont des critères importants pour la sélection matricielle. (Feng et al., 2021).

Les matériaux des supports d'immobilisation peuvent être divisés en trois types, à savoir la matrice inorganique, la matrice organique et la matrice organique-synthétique. Des supports inorganiques comme le gel de silice et le charbon actif sont stables et ont une bonne diffusion et caractéristiques d'écoulement. Aussi, la résistance à la contamination microbienne et généralement abordable ce qui constitue un avantage. Les protéines et les glucides tels que la cellulose ou la chitine appartiennent à la matrice organique, qui est peu coûteuse et disponible en grande quantité. Cependant, ces supports sont facilement contaminés par des microbes et possèdent des capacités de diffusion et d'écoulement limitées. Les supports à

matrice organique-synthétique sont d'accès facile, difficiles à contaminer par les formes de vie microbiennes et sont largement utilisés dans les procédures enzymatiques. Ces supports, cependant, peuvent provoquer une perte d'enzymes et réduire leur activité à cause de l'hydrophobie ou la propriété hydrofuge des supports. (Feng et al., 2021).

De nombreuses études réussies ont été menées sur les enzymes immobilisées et leur rôle dans le traitement des eaux usées. Par conséquent, les méthodes d'immobilisation doivent être sélectionnées selon l'objectif de recherche des matériaux plus adaptés doivent être étudiés pour parvenir à un meilleur système qui considère le coût, la stabilité et l'activité enzymatique (Feng et al., 2021).

4.3. Les systèmes liés aux médiateurs enzymatiques :

Les médiateurs enzymatiques sont des composés stables de faible poids moléculaire qui peuvent fonctionner comme un obturateur d'électrons entre l'enzyme et les substrats. Les médiateurs peuvent élargir la gamme des substrats enzymatiques en produisant des radicaux hautement réactifs. Aussi, ces petites molécules facilitent le processus enzymatique et améliorent l'efficacité d'élimination des polluants cibles. Typiquement, les médiateurs ont servi à améliorer le processus d'oxydation lorsque le potentiel redox de l'enzyme était supérieur à celui du substrat. (Feng et al., 2021).

Les médiateurs enzymatiques peuvent être divisés en médiateurs naturels et médiateurs synthétiques. La syringaldéhyde (SA), l'acétovanillone, le méthyle de vanille et l'alcool 4-hydroxybenzylique (HBA) sont des médiateurs naturels tandis que l'acide violurique (VLA) est d'origine synthétique. Malgré que les médiateurs sont capables d'améliorer le processus enzymatique, l'activité enzymatique peut être inhibée. Néanmoins, l'utilisation des médiateurs peut causer de nouveaux problèmes environnementaux car ils sont toxiques, mais ce ci est lié à la dose de médiateur. En dépit de leur toxicité, les médiateurs sont nécessaires lors du traitement des composés tels que TCS et oxybenzone. Ainsi, trouver une concentration de médiateur bon marché et appropriée pour améliorer la stabilité et l'efficacité du processus enzymatique sont extrêmement importantes. (Feng et al., 2021).

5. Traitement de la pollution minérale :

Les eaux usées des unités productrices de boissons renferment surtout de la pollution organique mais aussi de l'azote, du phosphore et d'autres minéraux provenant des opérations de lavages et de rinçage des cuves, des machines et des espaces de production. L'azote et le phosphore doivent être éliminés dans les eaux usées avant leur rejet dans la nature car ils

peuvent être responsables du phénomène d'eutrophisation des milieux récepteurs. Cette pathologie environnementale est la cause du comblement des plans d'eau et entraîne la réduction du pouvoir de rétention. En outre, les matières organiques azotées peuvent aussi entraîner une demande élevée en oxygène dans les cours d'eau, ce qui contribue à l'appauvrissement de l'oxygène dissous dans le milieu récepteur causant une perturbation du développement de la faune aquatique. (Sawdogo, 2018).

Le sodium pour sa part tire son origine de l'utilisation de produits de désinfection tels que la soude caustique et l'hypochlorite de sodium. Ces produits sont très disponibles, d'utilisation facile et bon marché. (Sawdogo, 2018).

La présence du sodium dans les eaux rejetées peut causer des altérations dans la structure du sol lors de la réutilisation des eaux usées ou des eaux usées traitées pour l'irrigation causant une diminution de la capacité de rétention de l'eau (Sawdogo, 2018).

5.1. Traitement de l'azote :

Dans les milieux aqueux, les composés azotés sont présents généralement sous forme organique mais aussi sous diverses formes minérales (ion ammonium, nitrites, nitrates.) voire gazeux (ammoniac dissout). L'élimination conventionnelle de l'azote par voie biologique passe par l'étape d'ammonification, puis à travers la nitrification et la dénitrification, elles-mêmes pouvant se diviser en sous étapes intermédiaires. La mise en œuvre de l'activité bactérienne est due à l'action de populations de microorganismes et des activités enzymatiques spécifiques aux formes azotées en solution (Sawdogo, 2018).

Dans le cas des systèmes intensifs à cultures en suspension, la mise en œuvre de l'opération repose sur l'utilisation soit de deux réacteurs biologiques en série, l'un aérobie pour oxyder les formes réduites en nitrates et l'autre anoxie pour réduire les formes oxydées produites en azote gazeux, soit d'un seul réacteur biologique alternant des phases aérée et anoxie, soit d'un mixage des deux systèmes avec un réacteur anoxie et un réacteur en alternance aéré/anoxie, notamment en cas de limitation de matière organique. On distingue donc :

- **L'ammonification :**

C'est la première étape de la dégradation des produits organiques azotés présents dans les effluents. Elle permet la transformation des formes organiques de l'azote en ion ammonium. (Sawdogo, 2018).

- **La nitrification :**

C'est le processus de transformation dans les eaux usées de l'azote ammoniacal en nitrate. La nitrification s'opère en deux étapes : la nitritation qui oxyde l'ammonium en nitrites et la nitratisation qui convertit les nitrites en nitrates. Ces deux processus sont réalisés en milieu aéré par des microorganismes spécifiques. La nitritation se fait par les bactéries autotrophes appelées bactéries nitritantes ou encore Ammonia Oxidizing Bacteria (AOB). Elles peuvent être réparties en cinq genres dont les noms portent le préfixe « nitroso » : *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus* et *Nitrosovibrio*. L'équation globale d'oxydation de l'ammonium en nitrite est alors donnée par l'équation suivante (Sawdogo, 2018) :



La réaction de nitratisation est réalisée par les bactéries nitritantes du genre *Nitrobacter Nitrospira*, *Nitrospina*, *Nitrococcus* et *Nitrocystis* appelées Nitrite Oxydizing Bacteria (NOB). L'équation de la réaction d'oxydoréduction globale de la nitratisation est donnée par l'équation suivante :



- **La dénitrification :**

C'est le processus biologique qui se déroule en condition d'anoxie, soit en teneur en oxygène dissout nulle et un potentiel d'oxydoréduction positif mais inférieur à 100 mV. Il permet la réduction des ions nitrates en azote gazeux en passant par des stades intermédiaires de composés oxydés d'azote, de nitrite, d'oxyde nitrique et d'oxyde nitreux notamment. Les microorganismes intervenant au cours de la dénitrification sont les bactéries hétérotrophes anaérobies facultatives. Ces bactéries utilisent l'oxygène intégré dans les ions nitrites et nitrates comme accepteurs d'électrons et la matière organique comme source de carbone et d'énergie. Les bactéries les plus fréquemment rencontrées sont des *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Paracoccus* et *Thiobacillus*. L'équation suivante résume les opérations se produisant lors de ce processus (Sawdogo, 2018) :



5.2. Traitement du phosphore :

D'après le rapport de l'IFC (2007), la concentration en phosphate dans les effluents de brasseries, varie entre 10 et 50 mg/L, dont 70% sont sous la forme soluble et le reste sous forme d'orthophosphate (HPO_4 , PO_4^{3-}). De façon conventionnelle, les processus de traitement primaire et secondaire éliminent environ 10 à 30% de phosphore dans les eaux usées, ce qui n'est pas suffisant au regard de la réglementation environnementale qui recommande une concentration en phosphore total de 50 mg/L dans les eaux usées de brasseries rejetées. Cette réglementation stipule que le processus biologique d'élimination du phosphore est basé sur l'exposition de la biomasse dans les conditions alternant anaérobie et aérobie. (Sawdogo, 2018).

Il en résulte donc une absorption élevée dans les cellules. Le processus est communément appelé « absorption cellulaire de luxe ». Cette alternance de conditions améliore l'élimination du phosphore par des microorganismes spéciaux appelés organismes accumulateurs de phosphore (OAP). Ces derniers sont capables d'absorber 7 à 8 % de phosphore dans leur masse cellulaire, alors que les autres microorganismes ont une capacité d'absorption de 1 à 2 %. Les cellules peuvent être éliminées par la sédimentation des boues riches en phosphore ou le phosphore peut être libéré des cellules et précipiter de façon chimique avec du sulfate d'aluminium, du chlorure de fer ou de la chaux (Sawdogo, 2018).

5.3. Elimination du sodium :

Le sodium est un élément secondaire dont la teneur naturelle dans les sols est faible mais toujours suffisante pour les besoins des cultures. Cette teneur est en général inférieure ou égale à 0,03%. Pour cela, l'analyse du sodium fournit une indication sur la salinité du sol. Dans le cas d'épandages massifs et répétés d'effluents sodiques (effluents agro-industriels type laiterie ou sucrerie), le suivi de la teneur en sodium est indispensable pour éviter les risques de déstabilisation structurale. (Sawdogo, 2018).

La présence du sodium, dans les eaux d'irrigation, requiert une attention particulière car un excès de cet élément entraîne un risque de dégradation de la structure du sol, particulièrement visible en surface par une aggravation de la battance. En cas de forte teneur, la croissance des végétaux est fortement perturbée et le pH du sol s'élève significativement. Le sodium est un élément retenu avec une faible énergie sur la capacité d'échange cationique (CEC). Il est donc facilement et rapidement lessivable par les pluies drainantes hivernales. (Sawdogo, 2018).

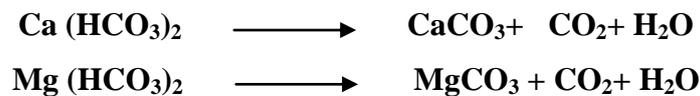
L'élimination du sodium dans les eaux fait appel à des procédés de filtration sur membranes (osmose inverse ou nanofiltration), d'électrodialyse, de désionisation (avec des

résines échangeuses d'ions) ou de distillation. En fait, l'osmose inverse est très utilisée dans le cadre du dessalement de l'eau de mer c'est-à-dire l'élimination du chlorure de sodium (NaCl). La nano filtration, pour sa part, permet avec une consommation énergétique moins importante que l'osmose inverse, de retenir les ions de façon générale avec des rendements intéressants. Ces rendements pourraient être suffisants dans le cadre du traitement des eaux usées où les besoins de réutilisation pour l'irrigation commandent des concentrations de sodium inférieures à 150 mg/L (Sawdogo, 2018).

5.4. Elimination du calcium et du magnésium :

Cette opération est communément appelée adoucissement. La dureté représente la teneur en calcium et magnésium dans l'eau. Il existe :

- **La dureté temporaire** : qui peut être éliminée par chauffage de l'eau car elle représente la combinaison du calcium et du magnésium avec les ion bicarbonate.



- **La dureté permanente** : elle ne peut pas être éliminée par chauffage et qui correspond à la combinaison du calcium et du magnésium avec les anions des sels d'acide forte (SAF) essentiellement chlorures et sulfates et plus rarement nitrate. (Ouali, 2017).

La dureté est la cause de multiples problèmes notamment de consommation excessive de détergents en blanchisserie et de formation de dépôts dans les chaudières. La dureté maximale acceptable pour une eau de consommation est de 300 à 500 mg/l exprimée en CaCO₃ alors qu'une dureté modérée est de 60 à 120mg /l. (Ouali, 2017).

L'adoucissement peut être réalisé de différentes manières. Il s'agit de précipitation chimique en utilisant divers réactifs échangeurs ioniques tels que : la chaux, carbonate de sodium (Ouali, 2017).

5.5. Elimination du silicium :

C'est beaucoup plus un procédé d'adsorption qu'une précipitation chimique. Le procédé est surtout appliqué dans le traitement des eaux de chaudières sous pression. Deux réactifs sont utilisés : l'aluminate de sodium et la magnésie anhydre (**Ouali, 2017**).

Conclusion

CONCLUSION

Conclusion :

Face à l'augmentation de la population et à la raréfaction de l'eau, la plupart des pays du monde recourent à cet effet au traitement des eaux des vallées et des océans. Ils utilisent une série de mécanismes physiques, chimiques et biologiques de traitement des eaux usées avant de les rejeter dans l'océan extérieur sans risque de pollution de l'environnement et de protection de la santé publique. Le traitement des vallées et des eaux océaniques par des méthodes physiques, chimiques et biologiques élimine une grande partie de divers microbes, polluants et substances nocives mais il ne suffit pas d'éliminer certains d'entre eux, comme les huiles, les graisses et les produits pharmaceutiques, ce qui nécessite le recours à des méthodes et des techniques telles que la méthode de traitement avec des enzymes.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A

Aba AakiR., 2012. Elimination des métaux lourds (Cd, Pb, Cr, Zn et As) des eaux usées industrielles et naturelles par le procédé d'infiltration-percolation. Thèse de doctorat. Université ibnou Zohr. Agadir. Maroc. 74-134p.

Amiri K., 2020. Contribution à l'évaluation et au traitement des eaux usées dans le sud-est du sahara algerien. Application au sud de la région d'Oued Righ (Touggourt). Thèse de doctorat, université kasdi merbah d'Ouargla. Touggourt. Algérie. 186p.

Auriol M., 2007. Enlèvement des perturbateurs endocriniens et hormones par oxydation enzymatique dans les eaux usées. Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique. Québec. Canada. 435p.

B

Bilal M., Adeel M., Rasheed T., YupingZ., Hafiz M.N. et Iqbal C., 2019. Contaminants émergents très préoccupants et leur biodégradation assistée par des enzymes. Environnement international, 124: 336-353.

Benkaddour B., 2018. Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Chélif (Algérie). Thèse de doctorat en cotutelle pour obtention le grade de docteur université de Perpignan via domitia et université de Mostaganem. Algérie. 192p.

Bouanane Y. et Boulhart N., 2020. Etude de l'efficacité du traitement des eaux usées de la station d'épuration de Sidi Merouane (Mila). Mémoire de Master T en génie civil. centre universitaire Abdel hafid boussouf de Mila. Algérie.

C

Canler, Liénard A., Héduit A. et Duchène P., 2001. Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités, France, Document technique, 2^{ème} édition, n°25, 1-79 P.

D

Dubreil J., 2001. Réflexion sur la notion d'indicateur de risques sanitaires liés au rejet d'eaux usées en milieu littoral. Mémoire de l'école national de la santé publique. Rennes. France. 90p.

Dhaouadi H., 2008. Traitement des eaux usées urbaines: Thèse de doctorat en procédés biologiques d'épuration. Université Virtuelle de Tunis. Tunisie. 34p.

Drouin M., 2013. Étude de stratégies visant à stimuler la production de protéase alcalines par *Bacillus licheniformis* en utilisation des boues d'épuration municipales comme substrat
Doctoral dissertation. Thèse de doctorat en science de l'eau. Université du Québec. Canada. 294p

E

Eme C. et Boutin C., 2015. **Composition** des eaux usées domestiques par source d'émission à l'échelle de l'habitation. Publication Onema.

ElAttiffi ElOquadassi A., 2011. La qualité microbiologique des eaux de baignade. Thèse de doctorat, université Muhamed v faculté de médecine et pharmacie. Rabat. 121p.

F

FengS., NgoH.H., Guo W.S., ChangB.W., Nguyen D.D., chengD., Varjani S., ZhongfongL. et Yi Liu G., 2021. Rôles et applications des enzymes pour l'élimination des polluants résistants dans le traitement des eaux usées. Technologie des bioressources, 125-278 p.

G

Grisales Palacio et Victeur.H., 2007. Modélisation et commande floues de type Takagi-Sugeno appliquées à un bioprocédé de traitement des eaux usées. Thèse de doctorat en système automatique. Doctorat de l'université Paul Sabatier Toulouse III et l'Université de Los Andes, Colombie. 230p.

Références bibliographiques

Guergour S., 2014. Elimination des polluants organiques contenus dans les eaux usées par Electro-Fenton. Pour l'obtention du diplôme de Magister en génie Electrochimique, université Ferhat Abbas –setif-1. 116 p.

J

Jardé E., 2002. Composition organique de boues résiduelles de stations d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation. Thèse de doctorat en science de l'univers, Université Henri Poincaré-Nancy I. France. 287p.

M

Metahri M.S., 2012. Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes: cas de la STEP est de la ville de Tizi Ouzou. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri. Algérie.

Methnani S., 2012. Diagnostic, reconstruction et identification des défauts capteurs et actionneurs: application aux stations d'épurations des eaux usées. Thèse de doctorat en génie électrique, Université de Toulon. France. 202p

O

Ouali M.S., 2017. Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux. Ingénierat en chimie industrielle option : Génie de l'Environnement. Edition : 2.10.4334.

R

Rejsek F., 2002. Analyses des eaux /Aspect réglementaires et techniques /Aspect Réglementaires et techniques de l'analyse des eaux usées et des boues d'épuration ». Série science et technique de l'environnement, deuxième partie ; 166, 170-171, 261-263 p.

S

Safa M. et Lekhal S., 2019. Evaluations des performances des traitements des eaux usées (cas de la STEP de TIARET). Mémoire de Master en Sciences Agronomiques, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem. Algérie. 99p.

Références bibliographiques

Sawadogo B., 2018. Traitement des eaux usées industrielles par des procédés membranaires sous climat sahélien: cas des eaux usées de brasserie au Burkina Faso. Thèse de doctorat en génie de procédés. Université Montpellier; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement. France. 196p.

Z

Zhuo R. et Fan F., 2021. Un aperçu complet de l'application des champignons de la pourriture blanche et de leurs enzymes lignocellulolytiques dans l'élimination des polluants organiques. Science de l'environnement total.

Référence webographique

Site01 :<https://www.actu-environnement.com/ae/news/eaux-usees-valorisation-rapport-onu28664.php4> (consulter le 22 mars 2021)

Site02 :<http://www.caue60.com/amenagement-paysager/eau-et-amenagements/les-principes-de-base-de-lepuration-des-eaux-usees/> (consulter 15/septembre/2021).

Thème :
Les enzymes dégradants les polluants des eaux usées

Résumé :

L'étude présente a pour objectif de rassembler les connaissances en relation avec l'application des enzymes au domaine de traitement des eaux usées afin de réutiliser l'eau sans danger et préserver l'environnement où elle sera rejetée. Dans la première partie on a parlé de l'origine et la composition chimique et microbiologique des eaux usées puis les principaux types de pollution de l'eau. Dans la deuxième partie on a abordé les étapes du traitement des eaux usées qui permettent la dégradation des polluants en particulier le traitement biologique. Enfin dans la troisième partie on a parlé du traitement enzymatique de divers polluants des eaux usées et dans lequel on a présenté les enzymes et leurs modes d'action dans ce contexte.

Mots clés : eaux usée, traitement biologique, enzyme, polluants, dégradation.

Devant le jury composé de :

Mme MERZOUG Amina	Maître de conférences B	Présidente
Mme BOUCHERIT Hanane	Maître de conférences B	Examinatrice
Mme HARRIECHE Ouahiba	Maître Assistant A	Promotrice
