

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة عمار تليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES
قسم البيولوجيا
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sciences biologiques

*Option : Microbiologie appliquée
Thème*

Les nouvelles approches et techniques de Décontamination des eaux usées par les procédés Biologiques

Présenté par :

Mme :BOUZIDI Habiba

Melle :DAHAM Fatima

Devant le jury composé de :

Président : CHAIBI Rachid

Pr UATL.

Examineur : CHETETHA Mohamed

MCA UATL.

Promoteur : BENACEUR Farouk

MCA UATL.

Co-promoteur : REZZOUG Asma

Doctorante UATL.

Soutenu le : 02/10/2022

Année universitaire : 2021–2022

Remerciements

On exprime tout d'abord nos remerciements et notre gratitude la plus profonde à Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté

pour entamer et accomplir ce mémoire.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre promotrice Dr.

***REZZOUG Asmaa** pour sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements, sa patience et sa persévérance dans le suivi de ce travail.*

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury d'avoir

Accepté d'évaluer notre travail :

***CHAIBI Rachid** pour avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

***CHETETHA Mohamed** et **BENACEUR Farouk** d'avoir accepté de faire parties du jury et de donner*

De son temps pour examiner ce travail.

*Sans oublier tous ceux qui nous ont aidé à réaliser ce
travail de près ou aide loin.*



Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mes très chers parents

À mon cher mari

À ma fille Aïcha Mayssane

À mes sœurs

À mes frères

À ma belle famille

*À tous ceux qui, ont contribué de près ou de loin à la
Réalisation de ce modeste travail.*

Habiba



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers Parents sans leurs amours, leurs sacrifices et leurs encouragements je ne serais jamais arrivée à réussir dans mes études.

Je sais bien quel que soit les remerciements que je leurs adresse c'est peu, que Dieu les protège et leur donne la santé et une longue vie.

À mes chères sœurs et Mon cher frère

À mes grands Parents que Dieu les protèges.

Une spéciale dédicace à mon cher frère Ahmed Chaib Que Dieu bénisse son âme.

À mes adorables amis.

Fatima



Résumé

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de faire une synthèse bibliographique des meilleurs bioprocédés et techniques nouvelles pour le traitement des eaux usées et de biodégradation des polluants émergent pour autant de cette différente origine (organique et inorganique).

Cette étude donc est consacrée aux traitements biologiques en particulier. En premier tout ce qui concerne les différents types des eaux, les polluants émergent et les paramètres de pollution (MES, DCO, DBO5, N). La deuxième partie aborde les procédés physico-chimiques et les procédés biologiques classiques.

En fin on a étudié le principe de fonctionnement de ces stratégies biologiques et leur importance au domaine de traitement de l'eau.

Mots clés : eaux usée, biodégradation, épuration, polluant organique.

Abstract :

The study presented in this dissertation aims to improve the bioremediation of wastewater through purification strategies and revolves around new techniques for the decontamination and biodegradation of pollutants emerging from these different origins (organic, inorganic).

This study is therefore devoted to biological treatments in particular. First of all, everything concerning the different types of water, the emerging pollutants and the pollution parameters (SS, COD, BOD5, N). The second part deals with the physico-chemical processes and the classic biological processes. Finally, we studied the principle of operation of these biological strategies and their importance in the field of water treatment.

Key words : waste water, biodegradation, purification, organic pollutant.

ملخص

تهدف الدراسة المقدمة في هذه الرسالة إلى تحسين المعالجة الحيوية لمياه الصرف الصحي من خلال استراتيجيات التنقية وتدور حول تقنيات جديدة لإزالة التلوث والتحلل البيولوجي للملوثات الناشئة من هذه الأصول المختلفة (عضوية، غير عضوية).

لذلك فان هذه الدراسة مخصصة للعلاجات البيولوجية على وجه الخصوص. الجزء الأول يتعلق بأنواع المياه المختلفة والملوثات الناشئة ومعاملات التلوث (المادة المعلقة-الطلب على الاكسجين الكيميائي-الازوت) . يتناول الجزء الثاني العمليات الفيزيائية والكيميائية والعمليات البيولوجية الكلاسيكية. أخيرا درسنا مبدا تشغيل هذه الاستراتيجيات البيولوجية واهميتها في مجال معالجة المياه.

الكلمات المفتاحية مياه المجاري التحلل البيولوجي تنقية ملوثات عضوية.

Sommaire

Remerciement.....	
Dédicace.....	
Résumé.....	
Table des matière.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des abréviations.....	
Introduction générale.....	01

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.1. La pollution de l'eau.....	04
1.2. Définition des eaux usées.....	04
1.3. les différents types des eaux usées.....	05
1.4. les caractéristique des eaux usées.....	06
1.4.1. paramètres organoleptique.....	06
1.4.1.1. Turbidité.....	06
1.4.1.2. La couleur.....	06
1.4.2. paramètres physiques.....	06
1.4.2.1. Température (T°)	06
1.4.2.2. Conductivité.....	07
1.4.2.3. Matière en suspension.....	07
1.4.2.4. Matière volatile en suspension.....	07
1.4.3. Paramètres chimique.....	07
1.4.3.1. Potentiel hydrogène.....	07
1.4.3.2. L'oxygène dissous.....	08
1.4.3.3. Demande chimique en oxygène (DCO).....	08
1.4.3.4. Demande biologique en oxygène (DBO).....	08
1.4.3.5. l'azote.....	09
1-4-4-Paramètres microbiologiques	09
1.4.4.1. Les coliformes.....	09
1.4.4.2. Salmonelles.....	10
1.4.4.3. Entérocoques fécaux.....	10
1.4.4.4. Clostridia sulfito-réductrices.....	10
1.4.4.5. Les helminthes.....	10
1.5. Les polluants	11
1.5.1. Les polluants physiques.....	11

1.5.2. Les polluants chimiques.....	11
1.5.2.1. Les polluants inorganiques.....	12
1.5.2.2. Les polluants organiques.....	14
1.5.3. Les polluants biologiques.....	16
1.6. Les microorganismes épurateurs.....	16
1.7. Choix d'un procédé de décontamination.....	17

Chapitre II : Les procédés classiques de décontamination des eaux usées

2.1. Procédés physiques et physicochimiques.....	19
2.1.1. Prétraitements.....	19
2.1.1.1. Dégrillage.....	19
2.1.1.2. Tamisage.....	19
2.1.1.3. Dessablage.....	20
2.1.1.4. Déshuilage et dégraissage.....	20
2.1.2. Traitement primaires.....	21
2.1.2.1. Décantation.....	21
2.1.2.1.1. Procédés de décantation chimique.....	21
2.1.2.2.A. La coagulation.....	21
2.1.2.2.A.a. Structure des colloïdes.....	22
2.1.2.2.A.b. Elimination des colloïdes.....	22
2.1.2.2.A.c. Coagulants et réactifs utilisés.....	22
2.1.2.2.B. La floculation.....	23
2.1.2.2.B.a. Détermination de la dose de coagulant/floculant.....	23
2.2. Procédés biologiques (traitement secondaire).....	24
2.2.1. Elimination de la pollution carbonée.....	24
2.2.1.a. Le traitement aérobie.....	24
2.2.1.b. Le traitement anaérobie.....	25
2.3. Les traitement tertiaires.....	25
2.3.1. Elimination de la pollution azotée.....	25
2.3.2. Elimination du phosphore.....	26
2.3.3. Désinfection.....	26
2.3.4. Traitement et élimination des boues.....	26
2.3.4.1. Epaissement.....	27
2.3.4.2. La stabilisation.....	27
2.3.4.3. Digestion.....	27
2.3.4.4. La déshydratation.....	27

2.4. Méthodes d'épuration des eaux.....	27
2.4.1. Techniques intensives.....	27
2.4.1.1. Epuration biologique à biomasse libre.....	27
2-4-1-1-1-Boues activées.....	27
2.4.1.2. Epuration à biomasse fixé.....	28
2.4.1.2.1. Lit bactérien.....	28
2.4.1.2.2. Disque biologique.....	29
2.4.2. Technique extensifs.....	30
2.4.2.1. Epuration à biomasse libre.....	30
2.4.2.1.1. Le lagunage.....	30

Chapitre III : Les nouvelles technologies des bioprocédés

3.1. Bioremédiation.....	32
3.2. Principe de la bioremédiation.....	32
3.3. Biodégradation des hydrocarbures dans le milieu marin.....	32
3.3.1. Bioaugmentation.....	33
3.3.2. La biostimulation.....	36
3.3.3. Biosurfactants.....	37
3.3.3.1. Classification des biosurfactants.....	38
3.3.3.2. Rôle des biosurfactants dans la biodégradation des hydrocarbures.....	39
3.3.3.3. Propriétés des biosurfactants.....	39
3.3.3.3.1. Activités d'émulsification.....	39
3.3.3.3.2. Abaissement de la tension superficielle et interfaciale.....	41
3.3.3.3.3. Concentration micellaire critique (CMC).....	42
3.3.3.3.4. Structure des biosurfactants et paramètres influençant leur micellisation..	43
3.3.3.3.5. Solubilité des biosurfactants.....	44
3.4. Immobilization.....	46
3.4.a. Utilisation de bactéries immobilisées sur microsphères d'alginate de calcium/biocharbon Bacillus sp. Pour l'élimination du phénol dans l'eau.....	46
3.4.b. L'immobilisation de micro-organismes sur des nano-soutports magnétiques....	47
3.5. Acclimated activated sludge.....	48
3.6. Packed bed bioréctor.....	49
Conclusion	52
Références bibliographiques.....	54

Liste de Figure

Figure 1.1 Les principales sources de pollution de l'eau.....	04
Figure2.1: Schéma d'un dessaleur.....	20
Figure2.2 : Schéma de la filière de traitement des boues.....	26
Figure2.3 : Schéma de la filière digestion des boues.....	27
Figure 2.4: Schéma de traitement des eaux usées par boues activées.....	28
Figure2.5 : Lit bactérien.....	29
Figure2.6 : Disque biologique.....	29
Figure 2.7 : Lagunage naturel.....	30
Figure3.1 : L'activité d'émulsification.....	40
Figure 3.2 : Illustration montrant la tension superficielle et interfaciale.....	42
Figure 3.3 : Représentation schématique d'une micelle de biosurfactant.....	43
Figure 3.4 : Représentation schématique d'une molécule de biosurfactants.....	44
Figure 3.5: Mécanismes de solubilisation des hydrocarbures dans les micelles du biotensioactif.....	45
Figure 3.6 : Photos de biochar chargé de bactéries ; (a) biochar, (b) biochar.....	47
Figure 3.7 : Schémas représente l'adsorption des métaux lourds par des micro-organismes magnétiquement modifiés.....	48
Figure3.8 : Bioréacteur à lit fixe.....	50

Liste de Tableaux

Tableau 1.1: Contaminants des eaux usées et leurs sources.....	05
Tableau 3.1: Liste des études sélectionnées pour la dégradation des hydrocarbures pétroliers par bioaugmentation (BA).....	34
Tableau 3.2: Principales classes, types de surfactants biologiques et quelques microorganismes producteurs.....	38

Liste des abréviations

MES : Matière en suspension

MVS: Matière volatile en suspension

pH : Potentiel hydrogène

T° : Température

DCO : Demande chimique en oxygène

DBO : Demande biochimique en oxygène

BA : Bioaugmentation

EMOP : Micropolluants organiques émergent

NH₄⁺ : L'azote ammoniacal

NO₃⁻ : Nitrate

NO₂⁻ : Nitrite

Cu : Cuivre

Zn : Zinc

Fe : Fer

Pb : Plomb

Hg : Mercure

Cd : Cadmium

DDT : Dichlorodiphényltrichloroéthane

HAP : Les hydrocarbures aromatiques polycycliques

COV : Les hydrocarbures halogénés volatils

Al₂(SO₄)₃ : le sulfate d'aluminium

NaAlO₂ : l'aluminate de sodium

FeCl₃ : le chlorure ferrique

Fe₂(SO₄)₃ : le sulfate ferrique

FeSO₄ : le sulfate ferreux

BS : Biostimulation

K₂HPO₄ : Phosphate de potassium dibasique

(NH₄)₂SO₄ : Sulfate d'ammonium

CMC : Concentration Micellaire Critique

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie et à l'activité de l'Homme, cependant cette première connaît une pression croissante due à l'explosion démographique, l'intensification de l'activité anthropologique ainsi qu'à des crises (Nichane et KHelil, 2015).

Le phénomène de pollution des eaux de surface est une conséquence directe des rejets d'effluents industriels et domestiques (Boughrira, 2015).

La pollution écologique typique des eaux souterraines autour des friches industrielles est généralement caractérisée par des teneurs élevées en substances pétrolières, hydrocarbures aliphatiques saturés, monoaromatiques et aromatiques polycycliques hydrocarbures, phénols, biphényles polychlorés, un certain nombre d'autres micropolluants dits polluants émergents, dont les produits pharmaceutiques et leurs dérivés, les agents de soins personnels, ainsi que les sous-produits des plastiques, des peintures synthétiques, des tensioactifs, des pesticides et de nombreuses autres substances, en particulier organiques, structures chimiques. L'exploitation minière et l'industrie métallurgique et de transformation. Les industries, en particulier l'ingénierie, sont également une source d'un certain nombre de travaux lourds. Métaux, qui contaminent la plupart des eaux souterraines dans des endroits similaires. Qu'il s'agisse de cette pollution de l'eau aura par la suite un effet négatif sur la santé de la population est actuellement largement commenté (Solcova, et al., 2022).

Le but de toute installation de traitement des eaux usées est d'avoir le meilleur rapport rendement coût. Classiquement, le traitement des eaux usées se compose de quatre phases successives qui sont les prétraitements, le traitement primaire, le traitement biologique (secondaire), lié à un traitement tertiaire pour l'élimination du phosphore. Si les deux premiers traitements permettent d'éliminer une partie des micropolluants (plutôt hydrophobes) adsorbés sur les particules, un traitement biologique optimisé permet en outre d'éliminer la plupart des micropolluants biodégradables (Margot, et al., 2011).

Les objectifs du traitement des eaux usées sont de transformer les matériaux disponibles dans les eaux usées en produits finis sûrs pouvant être éliminés en toute sécurité dans l'eau domestique sans aucun effet négatif sur l'environnement, protéger la santé publique, veiller à ce que les eaux usées soient traitées efficacement sur une base fiable, sans gêne ni infraction,

Introduction générale

recyclage et récupération des composants précieux disponible dans les eaux usées, fournir des processus de traitement et de techniques d'élimination réalisables et de respecter les législations, actes et normes légales et les conditions d'approbation de rejet et d'élimination (Samer,2015).

CHAPITRE I

Généralités sur les eaux usées

1-1-La pollution de l'eau :

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques; elle compromet les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu naturel (Sancey,2011).



Figure1.1 : Les principales sources de pollution de l'eau (Harikishore Kumar Reddy et Lee,2012).

1-2- Définition des eaux usées :

Les eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement des activités domestiques, agricoles et industrielles. Ces eaux englobent également les eaux de pluies et leur charge polluante, elles engendrent au milieu récepteur toutes sortes de pollution et de nuisance (Metahri et said, 2012).

1-3-LES DIFFÉRENTS TYPES D’EAUX :

On distingue généralement plusieurs types d’eaux : les eaux pluviales ou eaux de ruissellement sur les surfaces imperméabilisées ; les eaux domestiques ou eaux ménagères ; les eaux agricoles ; et les eaux industrielles. Parmi la famille des eaux industrielles, on trouve les eaux de refroidissement, les eaux de lavage, les eaux de fabrication ou de procédé, et les eaux domestiques.

Tableau1.1 : Contaminants des eaux usées et leurs sources (SANCEY,2011).

Contaminants	Source(s)
Solides (en suspension notamment	Domestique, industries, infiltration
Matières organiques biodégradables	Domestique, industries
Matières organiques réfractaires	Industries
Métaux lourds	Industries, mines
Engrais, pesticides	Secteur agricole
Nutriments	Domestique, industries, secteur
Solides dissous inorganiques	agricole
Organismes pathogènes	Domestique, industries
	domestique

1-4- les paramètres de pollution des eaux usées :**1-4-1-Paramètres Organoleptiques :****1-4-1-1-Turbidité :**

La turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux par la présence de matières en suspension (MES) fines. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale. Les unités utilisées pour exprimer la turbidité proviennent de la normalisation ASTM (American Society for Testing Material) qui considère que les trois unités suivantes sont comparables :

(Benyerou,2021).

Unité JTU (Jackson Turbidity Unit) = unité FTU (Formazine Turbidity Unit) = unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

1-4-1-2-La couleur :

C'est une indication de la pollution, la couleur des eaux dépend de la nature de ses composantes, par exemple les composés chimiques dissoutes dans les eaux usées domestiques lui donnent généralement une couleur grise (Benyerou,2021).

1-4-2-Paramètres physiques :**1-4-2-1-Température (T°)**

Ce phénomène est particulièrement important dans le cas de l'oxygène dissous. Aussi, plus l'eau est chaude, plus la concentration de saturation de l'oxygène devra diminuer, ce qui conduit à la diminution de la réserve d'oxygène mis à la disposition des micro-organismes intervenants dans les processus d'autoépuration, la multiplication des micro-organismes, affectant ainsi l'épuration biologique (Khaldi,2018).

1-4-2-2-Conductivité :

La conductivité électrique d'une eau (γ) est sa capacité à laisser passer et conduire le courant électrique, c'est l'inverse de la résistivité électrique (ρ), elle quantifie la concentration globale en ions dissous qui permettent le passage du courant, plus la concentration en ions dissous est élevée et plus la conductivité électrique est grande. La conductivité est mesurée par un conductimètre, le résultat est donné en micro-siéemens par centimètre ($\mu S/cm$) (Rodier et Legube, 2016).

1-4-2-3-Matière en suspension (MES) :

La détermination des matières en suspension dans l'eau s'effectue par filtration ou par centrifugation. La méthode par centrifugation est surtout réservée aux eaux contenant trop de matières colloïdales pour être filtrées dans de bonnes conditions, en particulier si le temps de filtration est supérieur à une heure (Rodier et Legube, 2016).

Les MES les plus fines contiennent l'essentiel de la pollution des rejets urbains. Elles sont séparées par décantation, filtration, centrifugation et sont exprimées par mg/L. Les solides suspendus dans un liquide incluent les solides sédimentables et non sédimentables. Les MES sont mesurées en filtrant l'eau à travers une membrane puis en séchant le filtre (Smith et Scott, 2005).

1-4-2-4-La matière volatile en suspension (MVS) :

Elle représente une fraction organique de MES. Elle est mesurée par calcination à une température de 525°C, elle constitue environ 70-80 % de MES (Benyerou, 2021).

1-4-3-Paramètres chimiques :**1-4-3-1-Potentiel hydrogène (pH) :**

Il mesure la concentration des ions H^+ dans l'eau. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. La valeur du PH peut altérer la croissance et la reproduction des micro-organismes existants dans une eau. La plupart des bactéries peuvent

croître dans une gamme de PH comprise entre 5 et 9, l'optimum est situé entre 6,5 et 8,5, des valeurs de pH inférieures à 5 ou supérieures à 8,5 affectent la croissance et survie des micro-organismes aquatiques selon l'organisation Mondiale de la santé (OMS) (Messrouk, 2011).

1-4-3-2-L'Oxygène Dissous

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques. La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu. La concentration en oxygène dissous est exprimée en mg/l (Solcova et al.,2022).

1-4-3-3-Demande chimique en oxygène (DCO) :

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau, quelle que soit leur origine organique ou minérale (fer ferreux, nitrites, ammonium, sulfures et chlorures). Ce test est particulièrement utile pour l'appréciation du fonctionnement des stations de traitement (Rodier et Legube, 2016).

1-4-3-4-Demande biologique en oxygène (DBO) :

Les phénomènes d'autoépuration dans les eaux superficielles résultent de la dégradation des charges organiques polluantes par les micro-organismes. La demande biologique en oxygène est, par définition, la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes vivants pour assurer l'oxydation et la stabilisation des matières organiques présentes dans l'eau usée (Boudebia et Kecheha,2017).

La DBO5 ou Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours, représente la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour oxyder (dégrader) l'ensemble de la matière organique présente dans un échantillon d'eau maintenu à 20°C, à l'obscurité, pendant 5 jours.

Pour mesurer la DBO5, on réalise une première mesure de la concentration en dioxygène dans l'échantillon d'eau. On répète cette mesure 5 jours plus tard. La DBO5 représente la

différence entre les deux concentrations mesurées. La valeur obtenue, représente environ 80% de la pollution biodégradable totale. La mesure de la DBO5 est très utilisée pour surveiller les rejets et le fonctionnement des stations d'épuration. (Elle est trop peu précise pour qualifier les eaux naturelles) (Khaldi,2018).

1-4-3-5-L'azote :

L'azote est un constituant majeur de la matière vivante et a un grand rôle dans la pollution des milieux aquatiques. L'azote présent dans les eaux usées est sous forme chimiquement réduite, il est retrouvé lié à la matière organique, telle que les protéines ou l'urée.

Ces formes réduites de l'azote, sont oxydées dans le milieu d'abord en nitrites, puis en nitrates, et enfin en azote gazeux qui rejoint l'atmosphère (Bourrier et al, 2017).

L'azote total représente la somme de l'azote présent sous toutes ses formes, à savoir l'azote organique, l'azote ammoniacal, les nitrates et les nitrites.

L'azote ammoniacal est toxique pour la vie aquatique. Dans les eaux naturelles, l'azote ammoniacal provient principalement du lessivage des terres agricoles ainsi que des eaux usées d'origine municipale et industrielle, une concentration supérieure à 1mg/l dans les eaux de surface est considérée comme indicateur de surfertilisation (Hébert et Légaré, 2000).

1-4-4-Paramètres microbiologiques :

1-4-4-1-Les coliformes

Le terme de « coliformes fécaux » ou de « coliformes thermo-tolérants » correspond à des coliformes qui présentent les mêmes propriétés (caractéristiques des coliformes) après incubation à la température de 44 °C. Le groupe des coliformes fécaux comprend entre autres les espèces suivantes : *Citrobacter freundii*, *Citrobacter diversus*, *Citrobacter amalonaticus*, *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter cloacae*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Klebsiella oxytoca*, *Moellerella wisconsensis*, *Salmonella*, *Yersinia enterocolitica* (Rodier et Legube, 2016).

1-4-4-2-Salmonelles

Les salmonelles sont en général considérées comme pathogènes bien que leur virulence et leur pathogénèse varient énormément : fièvres typhoïdes, salmonelloses systémiques, gastroentérites, toxi-infections alimentaires (Rodier et Legube, 2016). L'habitat principal de *Salmonella* est le tractus intestinal des humains et des animaux, elles sont trouvées dans l'environnement et peuvent survivre plusieurs semaines dans l'eau et dans le sol si les conditions de température, d'humidité et de pH sont favorables (Popoff et Le Minor, 2005).

1-4-4-3-Entérocoques fécaux :

Les entérocoques fécaux désignent un ensemble de bactéries vivant dans le tube digestif de l'homme et des animaux. Parmi les espèces représentatives nous citons *Escherichia coli* et *Enterococcus faecalis* anciennement appelée *Streptococcus faecalis* (Smith et Scott, 2005).

Les streptocoques du groupe D, à savoir *Enterococcus faecalis*, *E. faecium*, *E. durons*, *Streptococcus bovis*, *S. suis* et *S. equinus* sont généralement pris globalement en compte comme des témoins de pollution fécale, car tous ont un habitat fécal (Rodier et Legube, 2016)

1-4-4-4-Clostridia sulfito- réductrices :

Les *Clostridia sulfito-réducteurs* sont des bactéries à Gram positifs sporulantes de grande résistance permettront ainsi de distinguer une pollution fécale ancienne. Les *Clostridia* sont des anaérobies stricts à catalase et oxydase négative, produisent généralement d'acides organiques et d'alcools à partir de glucides et protéines (Boone et al., 2001).

1-4-4-5-Les helminthes :

Les helminthiases intestinales sont des maladies parasitaires animales et humaines dues à l'infestation par des vers, les helminthes. Les helminthiases se produisent généralement dans les pays où un assainissement efficace fait défaut. Ces agents pathogènes peuvent être transmis à l'homme lors du contact direct avec les eaux usées, ou indirectement par la

consommation de cultures irriguées avec ces eaux usées, ou encore par des produits alimentaires d'origine animale (Keffala et al, 2012).

1-5- LES POLLUANTS :

Un polluant est un élément introduit dans un écosystème et contribuant à dégrader sa qualité, à perturber son fonctionnement ou à contraindre ses usages.

1-5-1-Les polluants physiques :

La pollution physique est due essentiellement aux substances en suspension. Bien que sa forme commune est la pollution thermique. Elle peut englober également plusieurs autres aspects : couleur, transparence, pH dont on peut citer :

- ✓ Les matières en suspension désignent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau et la troublent.
- ✓ Les déchets solides divers (objets d'origines variés) posent des problèmes d'esthétiques.
- ✓ Les matières colorantes modifiant la transparence du milieu.
- ✓ La pollution thermique due au rejet des eaux utilisées pour le refroidissement des installations industrielles diverses.
- ✓ Les acides et les alcalins déchargés par l'industrie chimique et d'autres installations industrielles (Gaamoune,2010).
- ✓ Les risques nucléaires résultent des accidents divers ou des rejets des centrales nucléaires, ou dans le pire des cas, à partir d'une explosion nucléaire. Ces polluants sont notamment une série d'éléments et des composés radioactifs y compris les éléments dérivés de l'uranium, le plutonium, le césium, et l'iode (Gaamoune,2010).
- ✓

1-5-2-Les polluants chimiques :

Ces polluants chimiques peuvent se diviser en deux groupes :

- Les polluants organiques.
- Les polluants inorganiques (Gaamoune,2010).

1-5-2-1-Les polluants inorganiques :**• Le nitrate :**

La pollution des eaux par les nitrates est surtout due à un excès de nitrates au regard des capacités nutritives des plantes. Le surplus de nitrates est alors entraîné, par les pluies, dans les rivières et les nappes souterraines, risquant ainsi de polluer l'eau que nous buvons, mais aussi dans la mer. L'agriculture serait responsable à 66% de la pollution des eaux par le nitrate, l'industrie à 12%, les transports routiers et le secteur domestique à 22%. La pollution des eaux par les nitrates présente un double risque. Ingeré en trop grande quantité, les nitrates ont des effets toxiques sur la santé humaine. Par ailleurs, ils contribuent avec les phosphates à modifier l'équilibre biologique des milieux aquatiques en provoquant des phénomènes d'eutrophisation (Bourrier et al,2017).

• Le phosphore :

Le phosphore dans les eaux usées est essentiellement constitué de phosphore minéral ou inorganique et de phosphore organique. L'ensemble de ces deux formes constituent le phosphore total (Benmahdi,2019).

Les composés phosphorés sont utilisés dans divers domaines. Suivant les différents usages, les origines des phosphates des eaux usées sont classées en quatre groupes à savoir :

- Les phosphates provenant du métabolisme humain
- Les phosphates issus des produits lessiviels
- Les rejets industriels
- Les rejets agricoles (Benmahdi,2019).

• Les métaux lourds :

Un métal est un élément chimique, ayant un éclat métallique ; C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité, ayant des caractéristiques de dureté et de malléabilité, caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 g/ cm³. Le terme de métaux lourds est souvent employé pour désigner les métaux et métalloïdes associés à une contamination et ayant un potentiel toxique et écotoxique (Chibane et Djennad,2019).

Dans le milieu aquatique, un métal sera défini comme un élément chimique qui peut former des liaisons métalliques et perdre des électrons pour former des cations.

Les métaux lourds sont présents de façon naturelle, ils sont libérés lors des précipitations géochimiques des roches et de l'eau de source, l'activité volcanique et bactérienne, l'altération des continents et les incendies de forêts.

La source majeure de contamination est d'origine anthropique. Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation du flux de métaux, sont la pollution atmosphérique, la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle (Chibane et Djennad,2019).

Les sources anthropogènes sont les suivantes :

- ❖ Activités pétrochimiques.
- ❖ Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment).
- ❖ Exploitation minière.
- ❖ Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcation).
- ❖ Produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents Sources atmosphériques, par exemple combustion de carburants fossiles, incinération des déchets et émissions industrielles.
- ❖ Lessivage de métaux provenant de décharges d'ordures ménagères et de résidus solides (Chibane et Djennad,2019).

- **Métaux essentiels :**

Sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouve en proportion très faible dans les tissus biologiques. Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du zinc (Zn), du fer (Fe) (Chibane et Djennad,2019).

- **Métaux toxiques :** (non- essentiels)

Ils ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd) (Chibane et Djennad,2019).

Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement. La toxicité des métaux lourds est due essentiellement à :

- Leur non-dégradabilité.
- Leur toxicité à faible concentration.
- Leur tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer le long des Chaines trophiques (Chibane et Djennad,2019).

La toxicité de certains métaux non essentiels est reconnue, même à très faible concentrations (Pb, Cd, Hg,...), alors que les métaux essentiels peuvent également devenir dangereux à de fortes concentrations (Zn, Cu, Fe, Mn,...). La combinaison qui se manifeste entre les éléments non essentiels et ceux qui sont essentiels s'introduit par des interactions possédant une forte incidence sur la toxicité des métaux (Chibane et Djennad,2019).

1-5-2-2-Les polluants organiques :

- **Les pesticides :**

Ce sont des produits généralement de synthèse qui sont volontairement introduits dans l'environnement pour protéger les récoltes en agriculture ou pour lutter contre les vecteurs de maladie, notamment dans les pays tropicaux. On les retrouve dans différentes familles caractéristiques : les insecticides organochlorés (l'usage de la plupart de ces substances, comme par exemple le DDT, est réglementé ou interdit dans un grand nombre de pays industrialisés compte tenu de leur toxicité et de leur rémanence dans l'environnement), les insecticides organophosphorés, les herbicides du type aryloxyacides, triazines, urées substituées, etc.... (Rahmani et Chaibi, 2020).

- **Les hydrocarbures :**

Les hydrocarbures sont des composés organiques ne contenant que du carbone et de l'hydrogène, associés sous la forme de molécules d'une grande diversité. Ils regroupent différents produits pétroliers (pétrole brute, pétrole raffiné, kérosène, fuel, lubrifiants, huiles à moteurs), cette famille inclut :

- Les hydrocarbures aliphatiques.
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

- Les hydrocarbures halogénés volatils (COV)
- Les hydrocarbures aromatiques volatils (benzène, toluène, éthylbenzène, xylène) (Achab et Boukais,2016).

Les hydrocarbures responsables de la pollution des eaux peuvent provenir de nombreuses sources, tels que les effluents éliminés par l'industrie pétrolière, la pétrochimie, l'atelier de sidérurgie, ...etc.

Les effets des hydrocarbures sur l'environnement sont variés et complexes, leur toxicité est essentiellement liée à la volatilité et au caractère aromatique des molécules. Ils diminuent le renouvellement de l'oxygène et forment un obstacle aux rayons de soleil limitant ainsi la photosynthèse et entraîne une augmentation de la température et favorise la prolifération de microorganismes consommateurs d'oxygène (Rahmani et Chaibi, 2020).

- **Les détergents :**

Les détergents sont des produits à composition spécialement étudiée pour concourir au développement des phénomènes de détergence et dont les composants essentiels sont des agents de surface. Ces produits possèdent une grande extrémité hydrocarbonée non polaire, soluble dans l'huile et une extrémité polaire soluble dans l'eau. Les détergents sont également utilisés pour la solubilisation des protéines membranaires et des composants lipidiques. Selon la nature du groupement polaire hydrophile, on distingue quatre groupes d'agents de surface : les anioniques, les non-ioniques, les cationiques et les amphotères. Les tensioactifs anioniques, les LAS précisément sont nocifs pour l'environnement et consistent une menace pour la flore aquatique et la faune, participant à la pollution des eaux (Rahmani et Chaibi, 2020).

- **Le phénol :**

Le phénol pur (C_6H_5OH) est un solide incolore cristallisé à température ambiante. Il est hygroscopique et a une odeur âcre et douceâtre. Le phénol est un polluant cancérigène très répandu dans de nombreux effluents industriels. On le trouve dans les eaux usées des usines de transformation du charbon, des raffineries de pétrole, des industries papetières, des usines de fabrication de résines, de peintures, de textiles, de pesticides, des industries pharmaceutiques et des tanneries.

Il représenterait probablement le plus ancien désinfectant chimique, et sans doute celui sur lequel la plupart ont écrits. Au cours du dernier demi-siècle ou plus, la plupart des

désinfectants ont été comparés au phénol. Toutefois, malgré son importance historique, il n'est pas largement utilisé comme désinfectant aujourd'hui en raison de ses multiples risques sanitaires et écologiques. C'est une substance irritante et fortement corrosive ayant une forte capacité à pénétrer dans l'organisme par la peau et les muqueuses et risque d'infecter les systèmes cardiovasculaires, nerveux. Cependant, les composés phénoliques sont solubles dans l'eau et très mobiles ce qui les rendent très toxiques et susceptibles d'atteindre les sources d'eau potable en aval des rejets. De plus, ces composés peuvent causer de graves odeurs et un goût désagréables et posent des risques pour les populations même à une faible concentration. De même, le phénol agit sur le développement de certains poissons par sa bioaccumulation dans l'environnement aquatique (Rahmani et Chaibi, 2020).

1-5-3-Les polluants biologiques :

Les humains sont les plus importants pollueurs biologiques de la planète : les contaminants fécaux sont parmi les polluants biologiques des sources d'eau potable ; par conséquent l'homme et les animaux domestiques sont souvent contaminés par des microbes pathogènes.

Les bactéries présentes dans la matière organique peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et animale. Telles que les streptocoques, *Cryptosporidium*, *Escherichia coli* O157, etc.

En outre la pollution virale de la biosphère peut aussi avoir des effets dévastateurs et selon les estimations, il y en a dix fois plus de virus sur la Terre que l'ensemble des cellules vivantes (Gaamoune,2010).

1-6-Les microorganismes épurateurs :

Parmi tous les individus du monde protiste, trois populations jouent un rôle fondamental dans le traitement

- Les bactéries : unicellulaires, ces micro-organismes possèdent la structure interne la plus simple de toutes les espèces vivantes. Les tests effectués sur différentes populations ont montré que les bactéries sont composées de 80% d'eau et 20% de matière sèche dont 90% est organique. Elles croissent et se multiplient en général par scissiparité (scission binaire). Ces cellules représentent la plus importante population

de la communauté microbienne dans tous les procédés biologiques, avec souvent des concentrations qui dépassent 10⁶ bactéries/ml.

- Les protozoaires : de structure plus complexe que celle des bactéries, la distinction de protozoaires est plus simple. Certains groupes de protozoaires sont de redoutables prédateurs pour les bactéries. Ils ont la faculté de se déplacer et sont classifiés suivant leur mode de mouvement (nageurs, rampants, ...). Ces organismes peuvent jouer un rôle important au cours du processus d'épuration par leur abondance et leurs interactions avec les bactéries épuratrices (compétition et prédation).
- Les algues : ce sont des organismes photosynthétiques unicellulaires ou multicellulaires formant une population hétérogène. Les algues sont indésirables dans les sources d'eau car elles affectent leur goût et leur odeur. Dans le traitement, on les retrouve dans deux types de procédés uniquement : les lits bactériens ainsi que les bassins de lagunage, mais ce n'est que dans ces derniers qu'elles jouent un rôle bénéfique dans l'épuration (Saouli et Kerdoudi,2013)

1-7-CHOIX D'UN PROCÉDÉ DE DÉCONTAMINATION :

Lorsqu'une eau est polluée et qu'une action de dépollution apparaît nécessaire, il s'agit de choisir la filière d'épuration la plus adaptée pour atteindre les objectifs de décontamination, notamment ceux établis par la législation. Le choix s'avère généralement difficile à faire car il dépend de plusieurs critères.

- ✓ Une chaîne de traitement d'eaux usées industrielles doit se construire en fonction des objectifs de qualité recherchés (abattement de la pollution, rejet, recyclage...).
- ✓ Le choix de la combinaison des méthodes de traitement doit prendre en compte de nombreux paramètres (nature et concentration du ou des polluant(s), leur toxicité, volume d'eau à traiter et type d'effluent, etc...).
- ✓ Le traitement efficace d'une eau usée nécessite, en effet, une bonne connaissance de sa quantité (flux), sa qualité (composition chimique) et des variations temporelles de sa composition.
- ✓ Bien évidemment, les considérations technologiques (taille des infrastructures, conception modulaire de l'installation et évolution possible de la technique vis-à-vis de la réglementation) et surtout économiques (frais d'investissement, coûts de la méthode, frais d'entretien et de maintenance) sont des facteurs importants dans le choix du procédé à mettre en œuvre (Sancey,2011).

Chapitre II

*Les procédés classiques de
décontamination des eaux
usées*

2-1-procédés physiques et physicochimiques:

Les traitements physiques et physico-chimiques visent à débarrasser l'eau usée de ces éléments grossiers et qu'on peut le définir comme suit:

2-1-1-Prétraitements :

Le prétraitement est un l'ensemble d'opérations physiques et mécaniques destinées à extraire de l'eau brute. Ils ont pour objectif d'éliminer les éléments les plus grossiers qui sont Susceptibles de gêner les traitements ultérieurs. S'il s'agit de déchets volumineux (dégrillage), Des sables et graviers (dessablage) et des graisses (dégraissage-déshuilage) (Saadi et al,2019).

2-1-1-1-Dégrillage :

Le dégrillage est une opération indispensable pour éliminer de gros objets susceptibles de gêner le fonctionnement des procédés situés en aval. Il permet de séparer et d'évacuer les matières volumineuses, amenées par l'effluent à traiter. L'efficacité de ce traitement dépend essentiellement de l'écartement des barreaux des grilles qui sont de trois types (Saadi et al,2019) :

- Dégrillage fin (écartement 3 à 10 mm).
- Dégrillage moyenne (écartement 10 à 25 mm).
- Dégrillage grossier (écartement 50 à100 mm) (Saadi et al,2019).

2-1-1-2-Tamisage :

Le tamisage est un dégrillage poussé utilisé dans les stations d'épuration industrielles. Il consiste en une filtration sur toile mettant en oeuvre des mailles de différentes dimensions. Il existe un macrotamisage (mailles > 0.3mm) et un tamisage (mailles < 100µm) (Saadi et al,2019).

2-1-1-3-Dessablage :

Le dessablage consiste en l'élimination des sables présents dans l'effluent brute pour éviter leur dépôt dans les canalisations induisant leur bouchage et permet de réduire la production des boues et d'éviter de perturber les autres étapes de traitement, en particulier, le réacteur biologique (Saadi et al,2019).

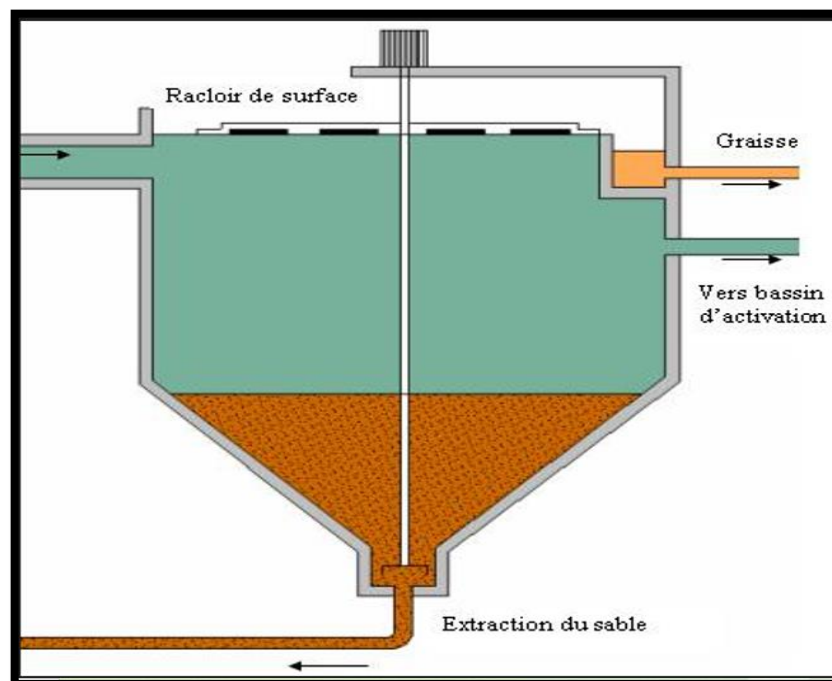


Figure2.1: Schéma d'un dessableur (Saadi et al,2019)

2-1-1-4-Déshuilage et dégraissage :

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (à la condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre de figer les graisses). Ces deux procédés visent à éliminer la présence des corps gras dans les eaux usées, qui peuvent gêner l'efficacité du traitement biologique qui intervient par la suite. La rétention environ 80% de la matière grasse lorsque la température est inférieure à 30°C (Saadi et al,2019).

2-1-2-Traitement primaires :

2-1-2-1-Décantation :

La décantation a pour principe d'éliminer les particules en suspension par gravité, les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé "décanteur" pour former les "boues primaires". Ces dernières sont récupérées au moyen d'un système de raclage.

L'utilisation d'un décanteur lamellaire permet d'accroître le rendement de la décantation, ce type d'ouvrage comporte des lamelles parallèles inclinées. Ce qui multiplie la surface de décantation et accélère donc le processus de dépôt des particules. Une décantation lamellaire permet d'éliminer plus de 70 % des matières en suspension. La décantation est encore plus performante lorsqu'elle s'accompagne d'une floculation préalable (Boumaaza,2020).

2-1-2-1-1-Procédés de décantation chimique :

La coagulation concerne des colloïdes et des particules très petites. Par contre, au niveau des particules plus grosses, nous parlerons de floculation. Ces processus sont considérés comme des traitements préparatoires.

De nombreuses séparations solide-liquide, la décantation et la flottation permettent d'éliminer 75% de la DBO et jusqu' à 90 % des matières en suspension. Cette technique comporte une première phase d'adjonction d'un réactif qui provoque l'agglomération des particules en suspension, puis une accélération de leur chute au fond de l'ouvrage (Boumaaza,2020).

2-1-2-2-A-La coagulation :

La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est à dire de faciliter leur agglomération. Les particules colloïdales sont des particules très petites qui ne peuvent pas s'agglomérer naturellement (Boumaaza,2020).

2-1-2-2-A-a-Structure des colloïdes :

Elles portent des charges négatives à leur surface ce qui attire les ions positifs en solution dans l'eau et forment la couche liée ou de STERN, qui attire ensuite des anions accompagnés d'une faible quantité de cations, c'est la couche diffuse ou de GOUY. Il y a donc formation d'une double couche ionique, l'un accompagnant la particule lors de ces déplacements, l'autre se déplaçant indépendamment ou avec un certain retard. On en déduit que l'élimination des particules colloïdales s'effectue par l'annulation des forces de répulsion. Ainsi, on ajoute un produit chimique coagulant, par exemple, du chlorure ferrique $\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ pour déstabiliser les particules et ainsi faciliter leur agglomération.

Il existe entre ces deux couches un potentiel électrostatique ou de NERNST, qui varie en fonction de la distance par rapport à la surface du colloïde. Dans la couche liée, le potentiel de NERNST décroît linéairement car les cations constitutifs sont empilés uniformément. En revanche, dans la couche de GOUY, le potentiel électrostatique varie de manière non linéaire, étant donné que la répartition ionique résulte d'un mélange aléatoire de cations et d'anions. La valeur du potentiel à la surface de la couche de NERNST est appelé potentiel zêta (Boumaaza,2020).

2-1-2-2-A-b-Elimination des colloïdes :

L'élimination des colloïdes passe par l'annulation du potentiel zêta afin d'annuler les forces de répulsion correspondant à deux phénomènes :

- Absorption et neutralisation des charges des colloïdes emprisonnement des particules colloïdales dans un précipité : les cations trivalents métalliques (Al^{3+}) utilisés ont la particularité de s'hydrolyser au contact de l'eau et forment un hydroxyde métallique insoluble lorsqu'ils sont à pH neutre (Boumaaza,2020).

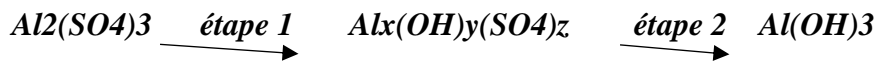
2-1-2-2-A-c-Coagulants et réactifs utilisés :

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules et produire des floes sont :

- Le sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$
- L'aluminate de sodium NaAlO_2
- Le chlorure ferrique $\text{FeCl}_3, 6 \text{H}_2\text{O}$
- Le sulfate ferrique $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, 9 \text{H}_2\text{O}$

- Le sulfate ferreux $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ (Boumaaza,2020).

L'efficacité de ces coagulants est directement liée à la valence des cations utilisés. Ainsi un ion divalent est jusqu'à 200 fois plus efficace et un trivalent jusqu'à 10000 fois plus efficace qu'un monovalent. La mise en solution d'un coagulant se déroule en deux étapes. Prenons l'exemple du sulfate d'aluminium : (Boumaaza,2020).



2-1-2-2-B-La floculation :

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité de rencontre entre les particules grâce à l'agitation du fluide. Cela permet aux particules de s'agglomérer et de former des amas de plus en plus gros (Boumaaza,2020).

Leur masse élevée leur permet ensuite de se déposer plus rapidement dans le fond du bassin sous l'effet de la gravité. Cette phase préalable à la décantation consiste à favoriser l'agglomération des matières déstabilisées ou précipitées sous l'influence d'une agitation lente qu'on appelle : floc.

Cette phase peut être optimisée par l'ajout d'un adjuvant de floculation : le floculant. C'est une molécule organique, cationique et polymérique qui va favoriser les pontages entre les particules déstabilisées (Boumaaza,2020).

2-1-2-2-B-a-Détermination de la dose de coagulant/floculant :

Quelques soit la matière à coaguler ou à précipiter, la détermination de la dose optimale de coagulant/floculant se fait au laboratoire grâce à un Jar-test :

- ❖ Introduction de quantités croissantes de coagulant dans des jarres contenant un litre d'eau à traiter et munie d'une hélice d'agitation
- ❖ Agitation rapide pendant 3 minutes : phase de coagulation
- ❖ Introduction éventuelle du floculant
- ❖ Agitation lente pendant 10 minutes : phase de floculation

Chapitre II :Les procédés classiques de décontamina-tion des eaux usées

- ❖ Arrêt de l'agitation et attente de 20 minutes : phase de décantation
- ❖ Analyse des différents paramètres de la pollution sur le surnageant et détermination des rendements d'élimination de la pollution (Boumaaza,2020).

2-2-Procédés biologiques (traitement secondaire) :

L'épuration biologique des eaux usées a pour but d'éliminer les matières organiques biodégradables. Cette dégradation biologique entraîne une transformation de matière par des micro-organismes qui reproduisent le processus de l'autoépuration naturelle dans des bassins et ils utilisent ces matières organiques comme nutriments. La dégradation peut se dérouler dans des conditions aérobies (présence d'oxygène) ou anaérobies (absence d'oxygène). On distingue aussi les cultures fixées (lits bactériens, disques biologiques), et les cultures libres (lagunage aéré, boues activées). Ce procédé est le plus souvent utilisé en aval d'un décanteur primaire. Chaque traitement sera caractérisé par une charge hydraulique qui permettra de déterminer le procédé à utiliser (Solcova et al.,2022).

2-2-1-Elimination de la pollution carbonée :

Suivant les conditions de l'environnement des cellules dans l'unité de dépollution, on distingue deux modes de traitements

2-2-1-a- Le traitement aérobie : Ce type de traitement fait appel aux bactéries aérobies qui se développent en présence d'oxygène. La dégradation des polluants est effectuée par des réactions d'oxydation dans un milieu aéré (Oller et al.,2010).

Pollution organique + Biomasse hétérotrophe \longrightarrow **Biomasse**
Soluble+colloïde aérobie (boue activé)

hétérotrophe en nombre élevé + CO₂ + H₂O.

Dégradation complète

Exemple des microorganismes qui font cette traitement :

Bacillus.subtilis

Pseudomonas

Vibrio (Oller et al.,2010).

Chapitre II : Les procédés classiques de décontamination des eaux usées

2-2-1-b- Le traitement anaérobie : Ce traitement s'effectue en condition d'anaérobiose. Les bactéries anaérobies assurent la décomposition métabolique des composés biodégradables par des processus de fermentation (Oller et al.,2010).

Pollution organique + Biomasse hétérotrophe \longrightarrow **Biomasse**
Soluble + colloïde anaérobie (boue en petite quantité)

hétérotrophe en petite quantité + CO₂ + H₂O + CH₄ $\xrightarrow{\text{Evaporation}}$
Dégradation incomplète

Les bactéries qui font cette traitement sont des bactéries anaérobie stricte (Oller et al.,2010).

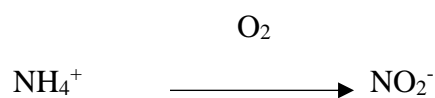
2-3- Les traitement tertiaires :

2-3-1-Elimination de la pollution azoté :

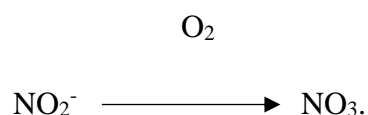
A- Ammonification : est le passage de l'azote organique vers la forme ammoniacal en utilisant quelques genres bactéries (*Corynebactérium*, *Flavobactérium*, *Achromobactérium*).



B- Nitrification biologique : est le passage d'azote ammoniacal vers le nitrite en présence d'oxygène et en utilisant des bactéries nitritantes ou nitrosantes (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosovibrio*, *Nitrosospira*).



➤ Nitratation : est le passage de l'azote nitrite en nitrate par des bactéries nitratantes (*Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*, *Nitrospina*).



Chapitre II : Les procédés classiques de décontamination des eaux usées

- Dénitrification biologique : consiste à éliminer les nitrates présents pour donner un produit en utilisant des bactéries hétérotrophes (Oller et al., 2010)



Polluante

2-3-2-Élimination du phosphore :

Précipitation physico-chimique : va permettre d'éliminer environ 25% de phosphore par l'ajout des trivalent (Oller et al., 2010).

Assimilation du phosphore } *Pseudomonas, Flavobacterium, Bacillus,*
La suraccumulation } *Acinetobacter, Achromobacter.*

2-3-3-Désinfection : est permet d'éliminer les microorganismes pathogènes par l'ajout de chlore ou par l'action des rayons UV.

2-3-4-Traitement et élimination des boues :

La filière de traitement des boues classique est composée de quatre étapes :

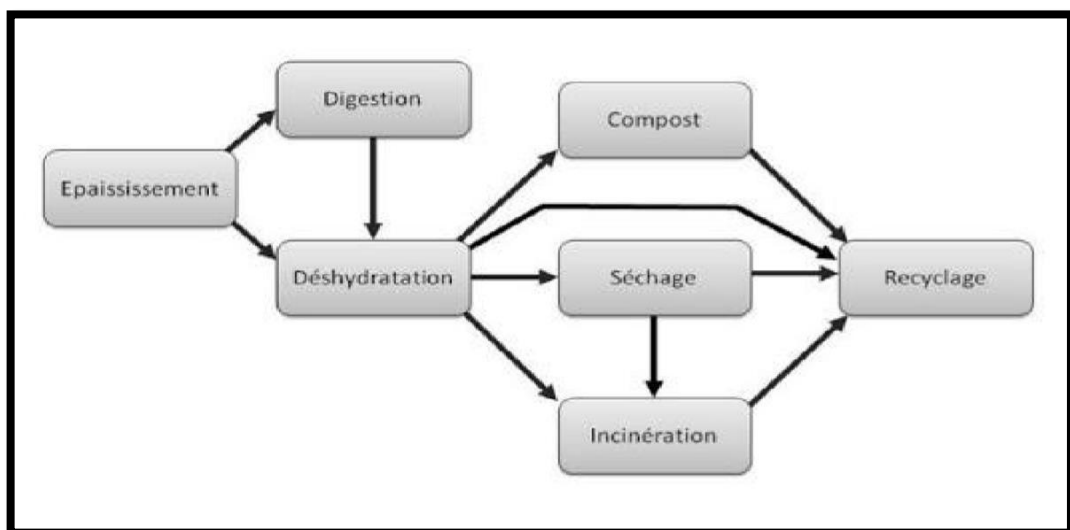


Figure 2.2 : Schéma de la filière de traitement des boues (google).

2-3-4-1-Epaississement : est une technique qui se base sur la décantation statique des boues (Crini et Lichtfouse, 2019).

2-3-4-2-La stabilisation : permet de diminuer drastiquement le volume d'eau dans la boue.

2-3-4-3-Digestion : est une technique qui repose sur l'oxydation de la matière organique en milieu anaérobie.

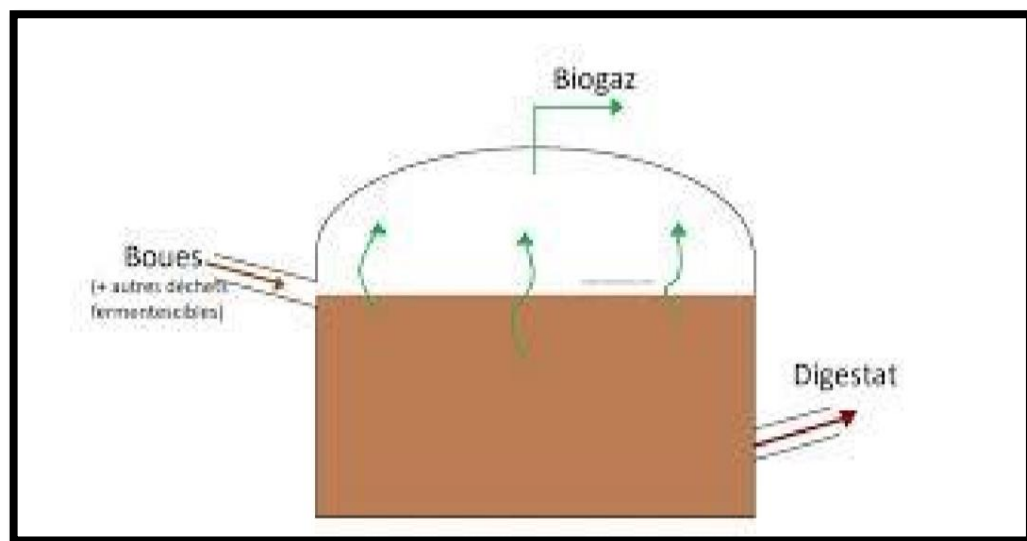


Figure2.3 : Schéma de la filière digestion des boues (google).

2-3-4-4-La déshydratation : permet de produire une boue pâteuse ou solide par le biais d'une augmentation de la siccité de la boue d'origine (Crini et Lichtfouse, 2019).

2-4-Méthodes d'épuration des eaux :

2-4-1-Techniques intensives :

2-4-1-1-Epuration biologique à biomasse libre :

2-4-1-1-1-Boues activées: c'est un procédé de traitement biologique intensif qui consiste à accélérer l'oxydation biologique par aération artificielle (de surface ou de fond) et recirculation des boues à partir du décanteur secondaire afin de maintenir une

Chapitre II : Les procédés classiques de décontamination des eaux usées

certaine concentration en micro-organisme à l'intérieur du bassin (Crini et Lichtfouse, 2019).

Ce système comprend deux compartiments principaux. Le premier est le bassin d'aération où ont lieu les activités biologiques de transformation des polluants biodégradables par l'intermédiaire des micro-organismes en suspension. Outre les matières organiques assimilées par les hétérotrophes, principaux constituants des boues activées (Bakiri, s.d).

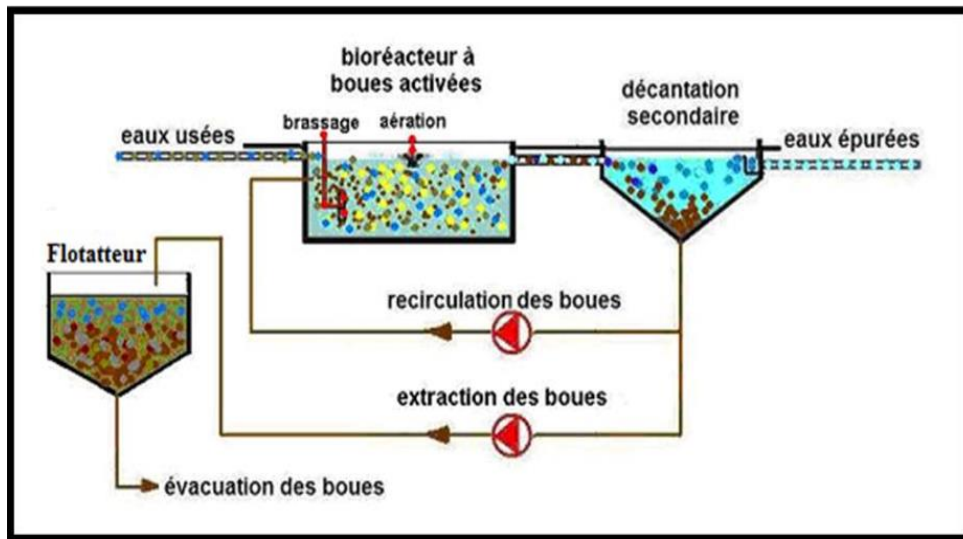


Figure 2.4 : Schéma de traitement des eaux usées par boues activées (Boumaaza,2020).

2-4-1-2-Epuration à biomasse fixé :

2-4-1-2-1-Lit bactérien : Ce traitement est basé sur le principe d'infiltration à travers le sol. Un lit bactérien se présente comme une colonne circulaire pouvant atteindre 4 à 5 mètres de hauteur dans laquelle se trouve un matériau poreux (Péloqui net sophi,2019).

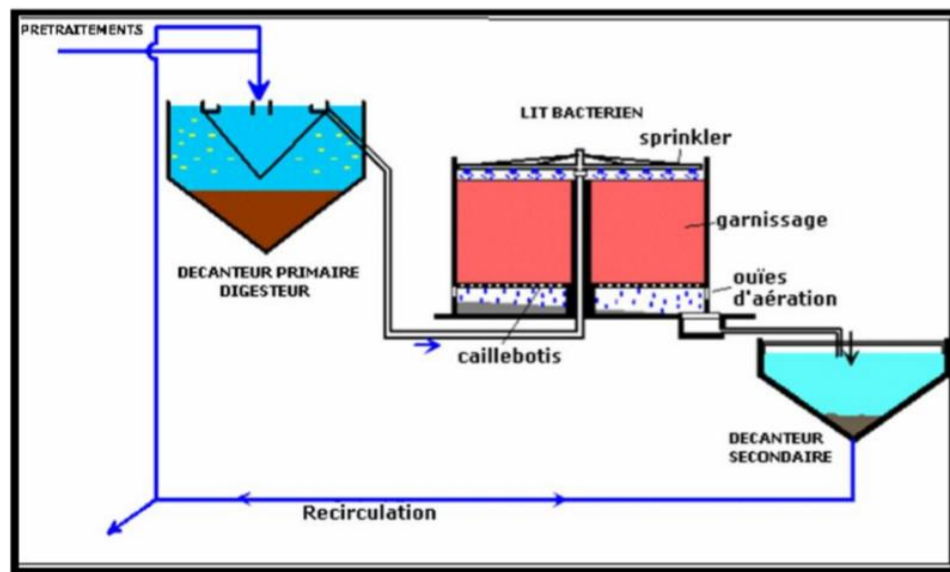


Figure2.5 : Lit bactérien (Boumaaza,2020).

2-4-1-2-2-Disque biologique : Dans ce procédé, les micro-organismes sont fixés sur des disques à demi immergés et tournant lentement (quelques tours par minute) autour d'un axe horizontal. La biomasse est ainsi alternativement mouillée par les eaux résiduaires et aérée par l'air ambiant. Cette technique présente l'avantage d'être peu coûteuse en énergie mais peut entraîner l'émanation d'odeurs (Bakiri,s.d).

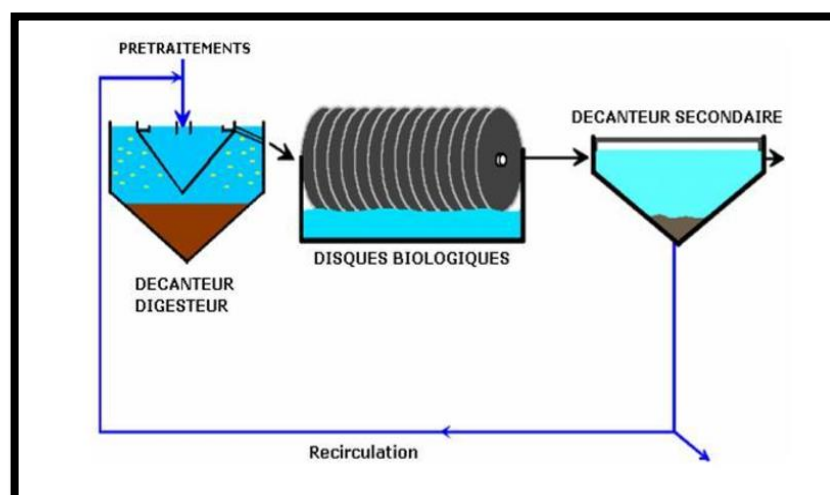


Figure2.6 : Disque biologique (Bakiri,s.d).

2-4-2-Techniques extensifs :

2-4-2-1-Epuration à biomasse libre :

2-4-2-1-1-Le lagunage : Ce sont des procédés utilisant de grandes surfaces (lagunes) s'appuyant sur les propriétés épuratrices d'un plan d'eau peu profond. On a deux types de lagunage :

- ✓ Lagunage aéré
- ✓ Lagunage naturel (Benyerou,2021).
- ✓

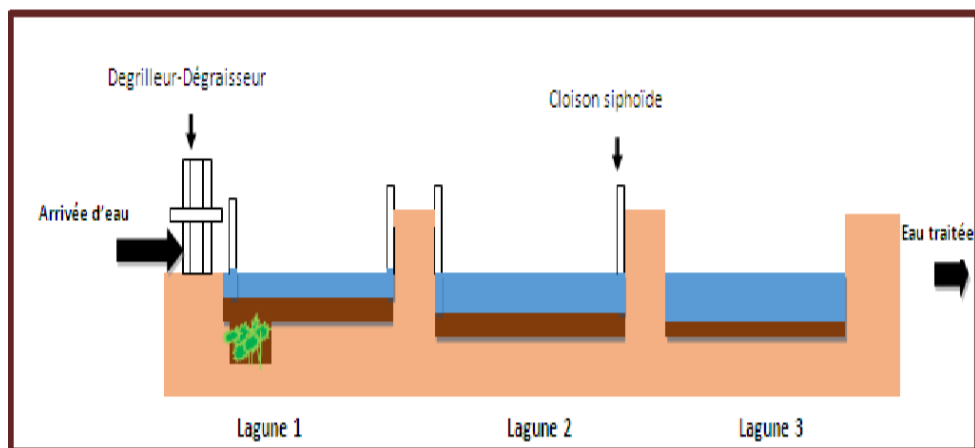


Figure 2.7 : Lagunage naturel (Boumaaza,2020).

Chapitre III

Les nouvelles technologies des bioprocédés

3-1-bioremédiation :

La nécessité de dépolluer les sites contaminés a conduit au développement de nouvelles technologies de l'environnement qui ont pour objectif de détruire les composés xénobiotiques plutôt que de les accumuler dans les décharges. La bioremédiation est une option qui offre la possibilité de détruire ou de rendre moins toxiques les polluant, en utilisant des activités biologiques naturelles (Abdelly,s.d).

3-2-Principe de la bioremédiation :

Le procédé de la bioremédiation consiste à activer la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes, la plupart des temps microscopiques (bactéries, micro-algues, champignons), à dégrader les polluants en composés inertes, comme l'eau. Ces organismes peuvent être indigènes (déjà présents dans la zone polluée), ou exogènes (ajoutés au milieu), ou encore être prélevés sur le site contaminé, cultivées au laboratoire puis réintroduits dans le site pollué(Abdelly,s.d).

3-3-Biodégradation des hydrocarbures dans le milieu marin :

Le milieu marin est l'un des milieux aquatiques les plus importants car il est extrêmement précieux en raison d'existence de divers écosystèmes et ressources naturelles utiles et applicables. La pollution marine est alarmante car lorsque les polluants, en particulier les déversements d'hydrocarbures ou les produits chimiques, qui sont la principale cause de pollution marine, pénètrent dans ces environnements, il peut modifier les caractéristiques biologiques et/ou physico-chimiques des sites aquatiques (Khalid et al,2021).

La bioremédiation est une méthode biotechnologique précieuse qui peut simplement être définie comme le processus de décontamination et l'atténuation des polluants provenant de l'environnement contaminé projeté via les activités microbiennes (Khalid et al,2021).

Dans la sous-section suivante, nous passons en revue trois technologies de bioremédiation courantes qui sont pratiques pour éliminer les déversements d'hydrocarbures dans les environnements marins par des micro-organismes (Khalid et al,2021).

3-3-1-Bioaugmentation :

Cette technologie consiste à introduire des cultures de microorganismes au milieu contaminé dans l'objectif d'augmenter la biodégradation des hydrocarbures. La technique repose sur l'addition d'une souche bactérienne pure pré-adaptée; ajout d'un consortium pré adapte; introduction de bactéries génétiquement modifiées; et l'addition de gènes pertinents de biodégradation conditionnés dans un vecteur à transférer par conjugaison dans des microorganismes indigènes. Généralement les microorganismes sont sélectionnés sur la base de leur aptitude métabolique à dégrader les hydrocarbures et également sur leurs caractéristiques essentielles qui permettent aux cellules d'être fonctionnellement actives et persistantes dans les conditions environnementales souhaitées (Benchouk,2017).

La bioaugmentation est connue sous le nom de processus de « polissage » ou de « finition », car l'impact d'un déversement de pétrole frais est trop lent pour se tourner vers des composants moins nocifs, car la concentration de pétrole fraîchement déversé est initialement très élevée. Lorsque des micro-organismes non indigènes sont exposés à des déversements d'hydrocarbures dangereux, afin d'éviter des effets néfastes sur la toxicité du déversement, ils cherchent à libérer une quantité appropriée de biosurfactant et à se séparer du déversement. Les bactéries dégradant les hydrocarbures pétroliers (indigènes et non indigènes) utilisent des enzymes intracellulaires qui permettent aux bactéries de transformer les hydrocarbures pétroliers en une autre source de nourriture. Microbes dégradant l'huile produits sur un milieu de culture contenant des hydrocarbures sont des agents microbiens concentrés. Les micro-organismes peuvent dans certains cas être colonisés sur le site d'un déversement dans les bioréacteurs (Khalid et al,2021).

Tableau 3.1 : Liste des études sélectionnées pour la dégradation des hydrocarbures pétroliers par bioaugmentation (BA) (khalid,2021).

Polluant	Micro-Organismes	Efficacités dégradées	Temps
0,5 % (v/v) d'huile de pétrole	<i>Pseudomonas, Rhodococcus Acinetobacter.</i>	66%	15 jours
1 % (v/v) de pétrole brut	<i>Bacillus sp., Corynebacterium sp., Pseudomonas sp., Pseudomonas sp</i>	77%	25 jours
1 % (v/v) de pétrole brut	<i>Betaproteobacteria, Gammaproteobacteria, Bacillus subtilis</i>	85.01%	7 jours
1 % (v/v) de pétrole brut	<i>Acinetobacter, Pseudomonas, Gordonia, Rhodococcus, Cobetia, Halomonas, Alcanivorax, Marinobacter, Microbacterium</i>	82%	7 jours
2 % (v/v) Carburant de cargaison	<i>Alcanivoraxborkumensis, Alcanivoraxdieselolei, Marinobacterhydrocarbonoclasticus, Cycloclasticus sp., Thalassolituusoleivorans</i>	79 _ 3.2%	14 jours
2% (v/v) diesel	<i>Pseudomonas aeruginosa, Bacillus subtilis</i>	87%	20 jours
5% (v/v) kérosène	<i>Citrobactersedlakii, Entrobacterhormeachei, Entrobacter cloacae</i>	69%	7 jours
1 % (v/v) de pétrole brut	<i>Bacillus algicola (003-Phe1), Rhodococcus soli (102-Na5), Isoptericolachiayiensis (103-Na4), Pseudoalteromonas agarivorans (SDRB-Py1)</i>	>85%	14 jous
1 % (v/v) de pétrole brut	<i>Paraburkholderia sp., Alloprevotellatannerae, Paraburkholderiatropica, Ralstonia sp., Paraburkholderiafungorum, Rhodococcus sp., Brevundimonas diminuta, Lactobacillus sp., Acidocella sp., Fungus Scedosporiumboydii</i>	81.45%	7 jours
20 (g/L) brut huile/eau	<i>Chlorella vulgaris</i>	94%	14 jours
10 mg/L pétrole brut eau de mer polluée	<i>Alcanivoraxborkumensis SK2</i>	95%	20 jours

D'après le **tableau 3.1**, nous pouvons voir que les chercheurs ont utilisé des micro-organismes à souche unique et à consortium pour dégrader les hydrocarbures pétroliers à l'aide de la méthode de bioaugmentation (khalid,2021).

La plupart des études sont réalisées à l'aide d'un consortium microbien. Dans les études ci-dessus discutées dans le tableau 3.1, des micro-organismes ont été isolés de site, comme l'eau de mer, le sol, etc. Les genres *Pseudomonas aeruginosa* et *Bacillus subtilis* sont généralement utilisés pour la bioaugmentation par les chercheurs (khalid,2021).

Les chercheurs ont pris différentes concentrations d'hydrocarbures pétroliers dans le test de biodégradabilité.

Les hydrocarbures pétroliers dans les études étaient le pétrole brut, le diesel, le kérosène, l'essence, le pétrole, l'huile de lubrification, etc (khalid,2021).

La gamme de différentes concentrations d'hydrocarbures pétroliers dans l'essai de biodégradabilité variait de 0,5 % à 5 % dans toutes les études ci-dessus mentionnées dans le tableau 5. Les études ci-dessus ont été menées soit en milieu de culture, soit en eau de mer.

Les micro-organismes basés sur la bioaugmentation ont réussi à dégrader complètement les hydrocarbures pétroliers dans certaines études et ont dégradé certains des composants sélectionnés dans quelques études. D'après les études énumérées ci-dessus dans le tableau 5, une efficacité de dégradation maximale jusqu'à une concentration de 5 % (v/v) d'hydrocarbures pétroliers en milieu aqueux est observée (khalid,2021).

Il a fallu 7 jours aux micro-organismes du consortium pour dégrader 85 % du pétrole brut à une concentration de 1 % v/v et le consortium utilisé dans cette étude était composé de *Betaproteobacteria* (47,4 %), *Gammaproteobacteria* (51,1 %), *Bacillus subtilis* (51,1 %).

Dans une étude similaire, un consortium de *Bacillus algicol* (003-Phe1), *Rhodococcus soli* (102-Na5), *Isoptericolachiayiensis* (103-Na4) et *Pseudoalteromonas agar-Ivorans* (SDRB-Py1) a dégradé plus de 85 % du pétrole brut avec une concentration de 1 % v/v .

Dans une autre étude, un consortium composé d'*Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Gordonia*, *Rhodococcus*, *Cobetia*, *Halomonas*, *Alcanivorax*, *Marinobacter* et *Microbacterium* a mis 7 jours pour dégrader 82 % de pétrole brut à une concentration de 1 % v/v. Les chercheurs ont observé une dégradation de 81,45% pour le pétrole brut à 1% v/v avec le consortium composé de *Paraburkholderia sp.*, *Alloprevotella tanneriae*, *Paraburkholderiatropica*, *Ralstonia sp.*,

Paraburkholderiafungorum, *Rhodococcus sp.*, *Brevundimonas diminuta*, *Lactobacillus sp.*, *Acidocella sp.* Et le champignon *Scedosporiumboydii*. Une étude similaire sur la dégradation du pétrole brut a été couronnée de succès avec une dégradation de 95 % en 20 jours en utilisant une seule souche d'*Alcanivoraxborkumensis* SK2. (khalid,2021).

3-3-2-La biostimulation :

La biodégradation des hydrocarbures dans l'eau peut être limitée par de nombreux facteurs, y compris les nutriments, le pH, la température, l'humidité, l'oxygène, les propriétés d'eau et la présence de contaminants (Benchouk,2017).

La biostimulation implique la modification de l'environnement pour stimuler l'activité des populations microbiennes autochtones d'eau par l'ajout des nutriments notamment l'azote, le phosphore, l'oxygène ou le carbone (par exemple sous forme de mélasse) au site contaminé, ils sont par ailleurs disponibles en quantités suffisamment faibles ce qui limite l'activité microbienne (Benchouk,2017).

Dans les environnements marins et d'eau douce, les déversements de pétrole brut et les effluents des raffineries de pétrole provoquent des augmentations spectaculaires des niveaux de carbone et des diminutions des niveaux d'azote et de phosphore qui peuvent affecter le processus de biodégradation. L'azote et le phosphore sont faibles dans les écosystèmes aquatiques et les zones humides ne peuvent pas fournir de nutriments en raison des fortes demandes en nutriments des plantes. L'introduction de nutriments est donc nécessaire pour faciliter la biodégradation des polluants (khalid,2021).

De même, les sources d'azote doivent être prises en compte. Dans certaines situations, l'azote, le phosphore et le fer sont des nutriments importants pour un processus de biodégradation réussi. Les additifs les plus populaires qui favorisent la croissance bactérienne dans la population bactérienne sont les sels de phosphate et de nitrate. Températures plus élevées, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et K_2HPO_4 améliorent également la croissance des micro-organismes (khalid,2021).

Selon certaines recherches sur la biostimulation des dégradeurs d'huile existants, il n'y a pas eu d'effets de gain durables avec l'introduction de bactéries dégradant l'huile d'hydrocarbures pétroliers. D'autre part, les chercheurs ont étudié le même problème à l'échelle du laboratoire et publié des résultats prometteurs, qui peuvent être utilisés comme étude de base pour des applications sur site pour nettoyer les déversements d'hydrocarbures pétroliers (khalid,2021).

Les micro-organismes indigènes restent privés de nutriments dans ce milieu naturel. L'apport de nutriments à ces micro-organismes leur permet de dégrader les polluants en effectuant anabolisme et catabolisme. Dans une zone de déversement contenant des hydrocarbures toxiques. Les nutriments ou les engrais peuvent être difficiles à utiliser pour favoriser le développement d'une population microbienne mangeuse de pétrole brut (khalid,2021).

La toxicité du pétrole affaiblit et/ou tue initialement plusieurs espèces indigènes de la zone de déversement (khalid,2021).

En raison de la toxicité de l'huile, les nutriments sont généralement empêchés de stimuler les microbes indigènes restants. Lorsqu'il n'y a pas de marée et que la zone de pétrole déversé a une toxicité réduite dans la mesure où les bactéries indigènes peuvent être retenues (barrages/barrières flottants comme bassin de bioréacteur de confinement de pétrole), la catégorie de bioremédiation BS peut être utilisée efficacement (khalid,2021).

3-3-3-Biosurfactants :

Les biosurfactants ou les bio-tensioactifs sont des tensioactifs naturels produits par des bactéries, des levures ou des champignons provenant de différents substrats, y compris les sucres simples, les huiles, les alcanes ou des hydrocarbures provenant d'un environnement contaminé. Ils ont la capacité de réduire la tension de la surface et de l'interface entre les substances liquides et solides (Cherif,2016).

Les biosurfactants sont des molécules amphiphiles constituées d'une partie hydrophile polaire et d'une partie hydrophobe non polaire. Généralement, le groupement hydrophile est constitué d'acides aminés, peptides ou de polysaccharides (mono ou di), le groupement hydrophobe est constituée d'acides gras saturés ou non saturés (Cherif,2016).

3-3-3-1-Classification des biosurfactants :

Tableau 3.2 : Principales classes, types de surfactants biologiques et quelques

Microorganismes producteurs. (Bouchali et Amirouche,2017).

Groupe/ Classe	Biosurfactants	Micro-organisme
Glycolipides	Rhamnolipides	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	Trehalolipides	<i>Rhodococcus sp.</i> ; <i>Nocardia</i> , <i>Mycobacterium</i> .
	Sophorolipides	<i>Candida bombicola</i> , <i>Candida</i> <i>Antartica</i>
Lipopeptides et lipoprotéines	Surfactine	<i>Bacillus subtilis</i>
	Viscosine	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Phospholipides	Phospholipide	<i>Corynebacterium insidiosum</i>
Acides gras	Acides gras	<i>Corynebacterium lepus</i>
Lipides neutres	Lipides neutres	<i>Clostridium pasteurianum</i>
Lipopolysaccharides ou Polymériques	Emulsan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>

3-3-3-2-Rôle des biosurfactants dans la biodégradation des hydrocarbures :

Il existe une relation claire entre l'activité d'émulsification, l'adhérence des cellules à l'hydrocarbure, et le taux de croissance des isolats sur le pétrole brut (Bouchali et Amirouche,2017).

Une étude sur des bactéries (*Pseudomonas* sp.) capables de dégrader le n-héxadecane en produisant des biosurfactants, a montré qu'en présence de n-héxadecane dans le milieu de culture, les bactéries sécrètent des substances qui forment un réseau de projections extracellulaires reliant les cellules les unes aux autres. Ce réseau est supposé être un complexe de biosurfactants et d'alcanes qui forme un site d'ancrage des cellules et un moyen de transport d'hydrocarbures à leur surface cellulaire. Le biosurfactant disperse l'héxadécane en petites gouttelettes, et forme une couche autour de chacune, augmentant ainsi sa disponibilité aux organismes dégradants (Bouchali et Amirouche,2017).

3-3-3-3- Propriétés des biosurfactants :

Les biosurfactants ont de meilleurs propriétés moussantes et une plus grande sélectivité.

Ils sont moins sensibles aux environnements extrêmes de température, de PH de la salinité.

Ils sont biodégradables et non ou peu toxiques, ce qui rend leurs applications environnementales intéressante (Nefouci,2015).

3-3-3-3-1-Activité d'émulsification

L'émulsification est une propriété fonctionnelle des biosurfactants qui fait référence à la dispersion d'une phase liquide dans une autre, provoquant le mélange de deux liquides non miscibles. La mesure de l'activité d'émulsification est l'une des méthodes utilisées pour l'évaluation de la production de biosurfactants par des microorganismes (Bouchali et Amirouche,2017).

Cette méthode a d'abord été décrite par PANCHAL et ZAJIC (1978), et elle nécessite un mélange d'un volume égal d'un composé hydrocarboné (le kérosène est l'huile couramment utilisé) avec l'échantillon, ensuite placer le mélange à la température ambiante pendant 24 heures. Comme indiqué sur la **figure3.1** une émulsion est formée lorsqu'un agent émulsionnant tel qu'un biosurfactant est présent (Bouchali et Amirouche,2017).

L'activité d'émulsification est une caractéristique importante des composés du biosurfactant et est exploitée par diverses industries telles que, les produits cosmétiques, alimentaires et en particulier les industries pharmaceutiques (Bouchali et Amirouche,2017).

Cependant, on sait également que les biosurfactants avec des poids moléculaires inférieurs (lipopeptides et biosurfactants à base de glycolipides) forment des émulsions stables (Bouchali et Amirouche,2017).

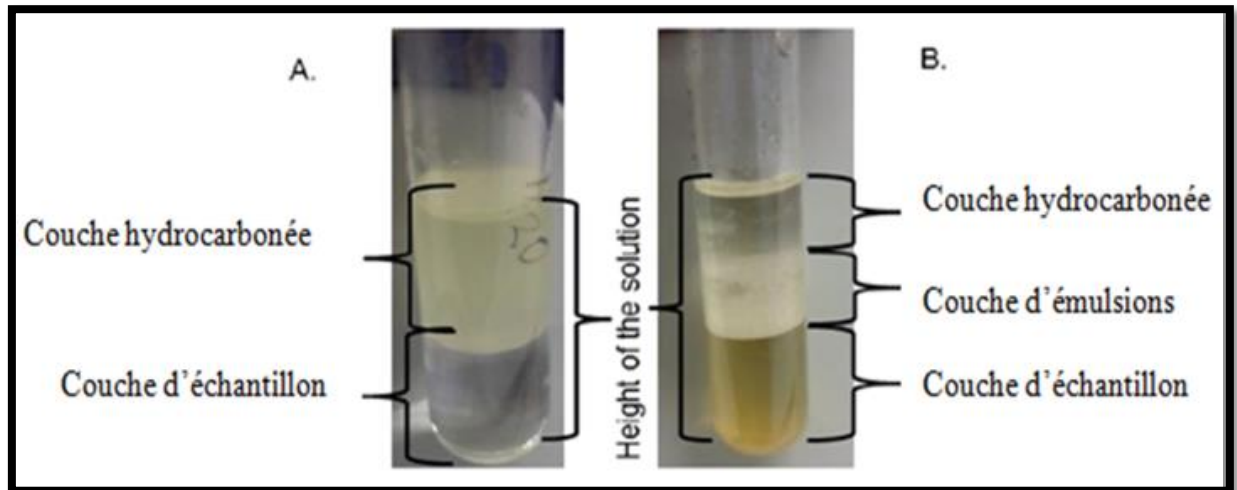


Figure3.1 : L'activité d'émulsification (Bouchali Amirouche,2017).

L'activité d'émulsification des biosurfactants montré par la **Figure3.1** (A) indique l'absence de formation d'émulsion entre un échantillon de culture bactérien et huile diesel après 24 heures à température ambiante, alors que pour l'illustration (B), montre l'apparition d'une couche d'émulsion entre un échantillon de culture bactérien et huile diesel après 24 heures à température ambiante, c'est-à-dire l'émulsion est formée lorsque les biosurfactants sont présents dans le milieu par rapport au tube (A) qui est marqué par leurs absences (Bouchali et Amirouche,2017).

De nombreuses études ont signalé l'application réussie de l'indice d'émulsification comme moyen d'évaluer la production de biomolécules de biosurfactants par divers microorganismes isolés à partir divers d'environnements (Bouchali et Amirouche,2017).

3-3-3-3-2-Abaissement de la tension superficielle et interfaciale

Les biosurfactants sont connus pour leur excellente activité de surface qui sert à plusieurs fins. Pour cela la propriété la plus importante d'un tensioactif est la réduction de la tension superficielle, qui est la force d'attraction entre les molécules liquides. La surface est considérée comme la limite entre un liquide et l'air et l'interface est considérée comme la limite entre deux liquides. Ainsi, la tension entre les phases air / eau et huile / eau sont connues sous le nom de tension superficielle et de tension interfaciale, respectivement (Bouchali et Amirouche,2017).

La capacité à abaisser la tension superficielle et interfaciale est causée par l'adsorption du bio-tensioactif à différentes phases. Il en résulte plus d'interaction et de mélange de phases dissemblables qui fonctionnent pour solubiliser des substrats hydrophobes (Bouchali et Amirouche,2017).

Les microorganismes sont fortement influencés par les phénomènes interfaciaux, en particulier lorsque la paroi cellulaire ou la membrane de ces organismes interagit avec l'environnement externe. Cela stimule la synthèse des biosurfactants utilisée par les microorganismes. Pour cela les propriétés interfaciales des bio-tensioactifs influencent alors la croissance des microbes comme suite : la séquestration des métabolites toxiques, ainsi que la réduction ou l'augmentation de la disponibilité des substrats pour l'absorption des nutriments (Bouchali et Amirouche,2017).

Comme l'illustre la **figure (A)**, les molécules d'eau sont liées par des forces cohésives qui créent une tension superficielle. Lorsqu'un tensioactif est ajouté à l'eau **figure (B)**, la tension superficielle de l'eau est réduite (Bouchali et Amirouche,2017).

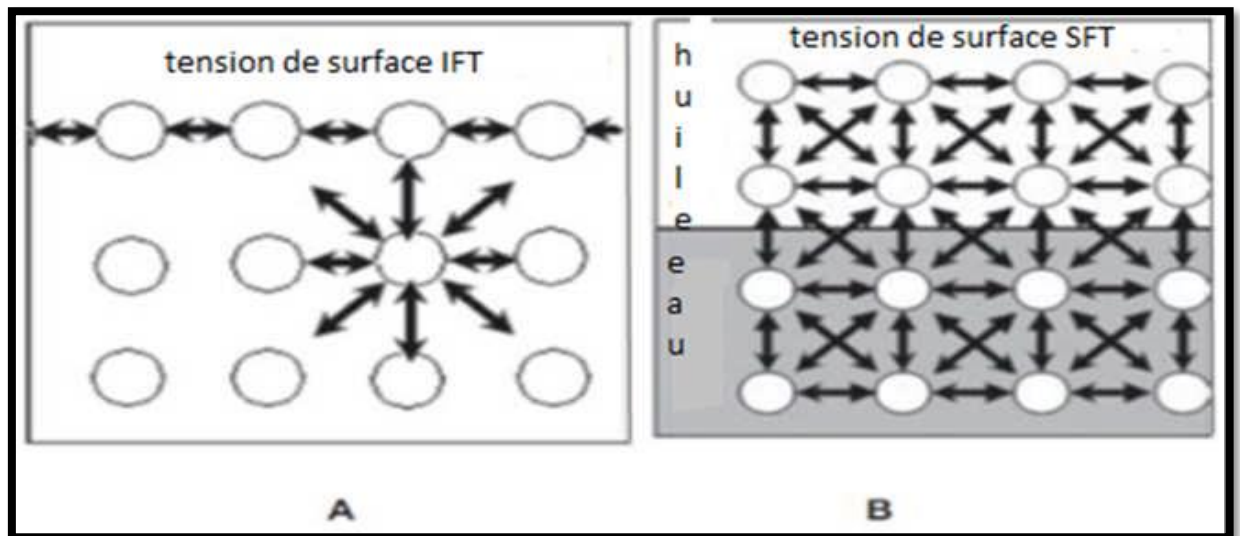


Figure 3.2 : Illustration montrant la tension superficielle et interfaciale (Bouchali et Amirouche,2017).

3-3-3-3-3- Concentration micellaire critique (CMC)

La concentration micellaire critique (CMC) est par définition la concentration d'un agent de surface (biosurfactant) au-dessus de laquelle, une partie des molécules dispersées au sein de la solution aqueuse se rassemblent sous forme de micelle. Les micelles se forment lorsque les portions hydrophobes incapables de former des liaisons hydrogènes en phase aqueuse créent une forte augmentation de l'énergie libre du système. Une façon d'abaisser cette énergie est d'isoler la partie hydrophobe de l'eau par adsorption sur des matrices organiques ou de former des micelles. En effet, dans les micelles les parties hydrophobes se regroupent vers le centre et les portions hydrophiles restent en contact avec l'eau (Bouchali et Amirouche,2017).

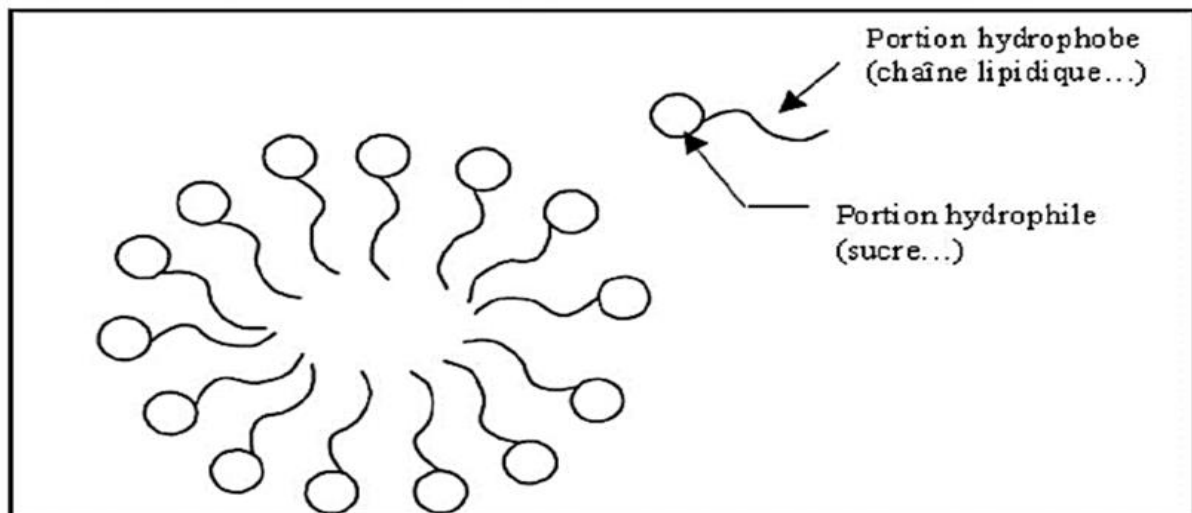


Figure 3.3 : Représentation schématique d'une micelle de biosurfactant (Bouchali et Amirouche,2017).

3-3-3-3-4-Structure des biosurfactants et paramètres influençant leur micellisation :

Les micelles de biosurfactants s'arrangent en différentes microstructures sphériques, globulaires ou cylindriques, mais des vésicules sphériques et irrégulières, des bicouches tubulaires ou des structures lamellaires sont le plus souvent rencontrées (Bouchali et Amirouche,2017).

Le volume intérieur des micelles dépend de sa forme et du nombre d'agrégation (nombre de monomères constituant la micelle). Généralement, il faut de 50 à 100 monomères pour former une micelle. Le nombre d'agrégation augmente quand l'aire de la section transversale de la partie hydrophile (**ah**) diminue (**Figure**). **Lc** représente la longueur de la chaîne hydrophobe et **VH** le volume occupé par celle-ci. La forme de la micelle dépend également de la structure du biosurfactant (Bouchali et Amirouche,2017).

Quand le nombre d'agrégation augmente, le volume intérieur de la micelle augmente.

La morphologie des agrégats varie avec le pH, la concentration en biosurfactant, la température ou la force ionique (Bouchali et Amirouche,2017).

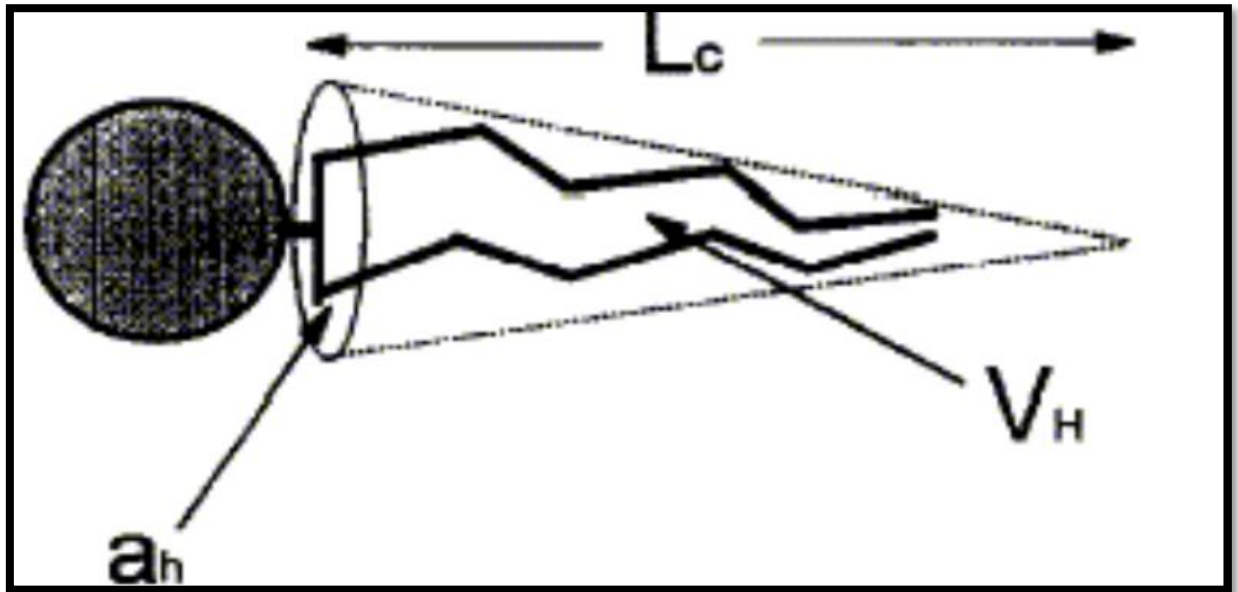


Figure 3.4 : Représentation schématique d'une molécule de biosurfactants (Bouchali et Amirouche,2017).

3-3-3-3-5- Solubilité des biosurfactants

Les biosurfactants à faible masse moléculaire telle que, les glycolipides, les phospholipides et les lipopeptides, sont efficaces pour abaisser les tensions superficielles et interfaciales, alors que les biosurfactants de masse moléculaire élevée contenant des polysaccharides amphipathiques, des protéines, des saccharides lipopoliques, des lipoprotéines ou des mélanges complexes de ces biopolymères sont plus efficaces pour solubiliser les émulsions huile dans l'eau. Parmi les biosurfactants les mieux étudiés, on retrouve les rhamnolipides qui appartiennent à la classe des glycolipides. Ces rhamnolipides ont été identifiés comme prédominants chez *Pseudomonas aeruginosa* (Bouchali et Amirouche,2017).

Des recherches effectuées sur ces rhamnolipides, dans des cultures liquides secouées complétées par des composés hydrophobes, dans telles conditions, ces rhamnolipides sont libérées dans le milieu sous forme de monomères qui s'accumulent sous forme des micelles et des vésicules plus grandes lorsque la concentration atteinte et dépasse un niveau critique de micelle (CMC). Les hydrocarbures sont incorporés dans le noyau hydrophobe des micelles, ce qui améliore efficacement leur dispersion dans la phase aqueuse et donc leur biodisponibilité pour l'absorption par les cellules. Ce procédé a été étudié en grande partie avec des alcanes comme substrats modèles qui est appelé « solubilisation de micelles » (**Figure 3.5**) (Bouchali et Amirouche,2017).

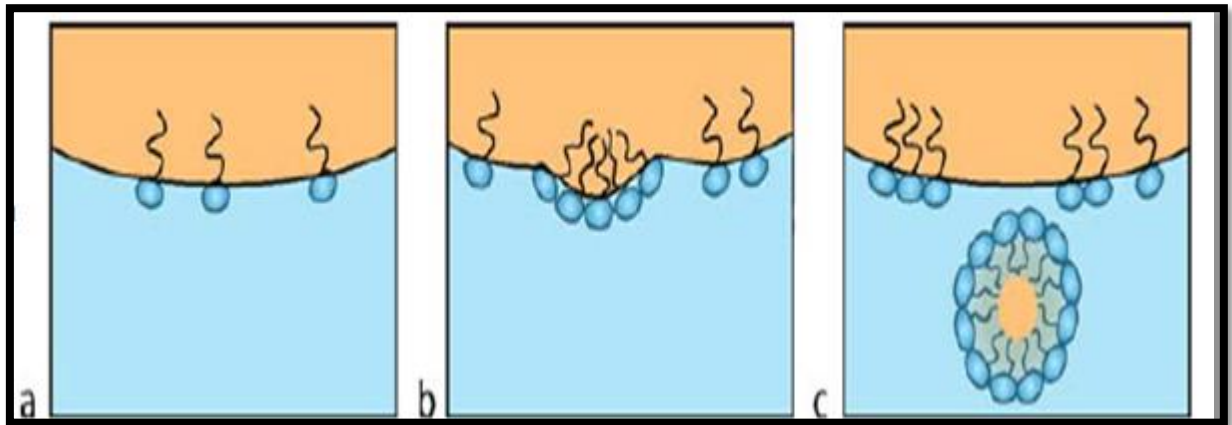


Figure 3.5: Mécanismes de solubilisation des hydrocarbures dans les micelles du biotensioactif (Bouchali et Amirouche,2017).

A faible concentration, les bio-tensioactifs se présentent sous forme de monomères à l'interface entre les phases aqueuses et hydrocarbonées (a). Lorsque la concentration augmente et que l'espace disponible diminue, les biosurfactants ont tendance à se répartir en granules (b) jusqu'à un point appelé « concentration critique de micelles », au cours duquel des micelles sont formées en piégeant les hydrocarbures dans leur noyau hydrophobe (c). Une fois dispersés, les hydrocarbures deviennent disponibles pour l'adsorption par les cellules bactériennes afin de les dégrader (Bouchali et Amirouche,2017).

Les activités du biosurfactants dépendent de la concentration des composés tensioactifs jusqu'à obtention de la concentration critique de micelle (CMC) (Bouchali et Amirouche,2017).

La concentration à laquelle les micelles ont commencé à se former a été représentée sous le nom de CMC. A des concentrations supérieures à la CMC, les molécules de biosurfactants s'associent pour former des micelles, des bicouches et des vésicules. La formation de micelles permet aux biosurfactants de réduire la tension superficielle et interfaciale et d'augmenter la solubilité et la biodisponibilité des composés organiques hydrophobes (Bouchali et Amirouche,2017).

3-4-Immobilization :

La technologie d'immobilisation comprend la technologie des enzymes et des micro-organismes immobilisés. La plupart des études ont montré que le micro-organisme immobilisé avait le potentiel d'améliorer l'étanchéité et de contrôler les processus biologiques dans les systèmes de bioréacteur en raison de ses avantages de séparation solide-liquide, de réutilisation de la biomasse et de stabilité opérationnelle (Jian et al.,2022).

3-4-a-Utilisation de bactéries immobilisées sur microsphères d'alginate de calcium/biocharbon *Bacillus sp.* Pour l'élimination du phénol dans l'eau

À l'heure actuelle, l'élimination du phénol de l'eau fait principalement appel à des méthodes physiques, chimiques et biologiques. Comparée aux méthodes physiques et chimiques, la biodégradation est la méthode la plus prometteuse en raison du faible coût, de l'efficacité élevée et de la production de produits inoffensifs pour l'environnement après dégradation

Les micro-organismes dotés d'une capacité d'élimination du phénol sont de nature très diverse. Un nombre croissant de souches microbiennes dégradant le phénol ont été signalées, Parmi divers micro-organismes, la souche bactérienne de *Rhodococcus sp* est considéré comme le candidat le plus prometteur pour une utilisation potentielle comme agent de dégradation phénolique.

Le biochar a été largement utilisé pour adsorber et décomposer les polluants, en raison de ses caractéristiques uniques de grande surface, de porosité élevée, de groupes fonctionnels multiples, d'une grande capacité d'échange de cations et d'une bonne stabilité (Jian Li et al.,2022).

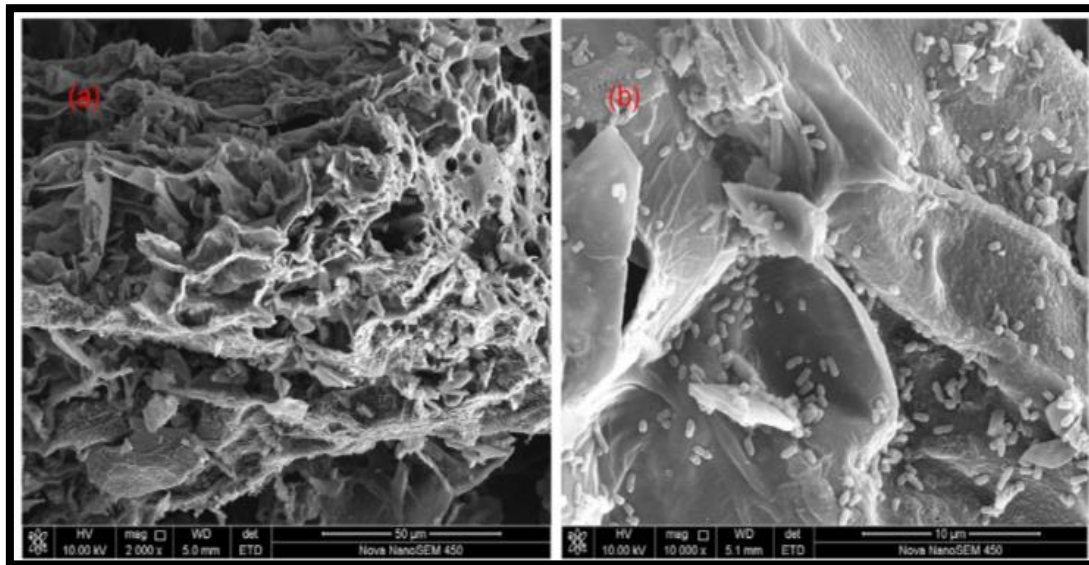


Figure 3.6 : Photos de biochar chargé de bactéries ; (a) biochar, (b) biochar (Jian Li et al.,2022).

3-4-b- L'immobilisation de micro-organismes sur des nano-suppports magnétiques

Les procédés de biosorption apparaissent comme une technologie alternative économique et écologique pour l'élimination des polluants présents dans l'environnement. Une application du processus de biosorption se trouve dans l'immobilisation des cellules microbiennes pour l'élimination des polluants toxiques dans les eaux usées industrielles. L'immobilisation de micro-organismes sur des nano-suppports magnétiques est une nouvelle technique pertinente appliquée pour obtenir des biocatalyseurs pour le contrôle de la pollution de l'environnement, Considérant l'application pertinente des nanoparticules magnétiques comme support pour l'immobilisation de micro-organismes dans l'élimination des métaux lourds de l'environnement.

La biosorption présente des avantages par rapport aux méthodes conventionnelles, tels que de faibles coûts d'exploitation, aucune production de composés secondaires et des temps d'opération courts, pour cela on met l'accent sur l'application de cette technologie dans la biosorption des métaux lourds et des éléments apparentés qui comprend l'immobilisation de la biomasse microbienne sur des nanoparticules magnétiques à appliquer comme biosorbants dans le traitement des eaux usées (Ellen et al.,2020).

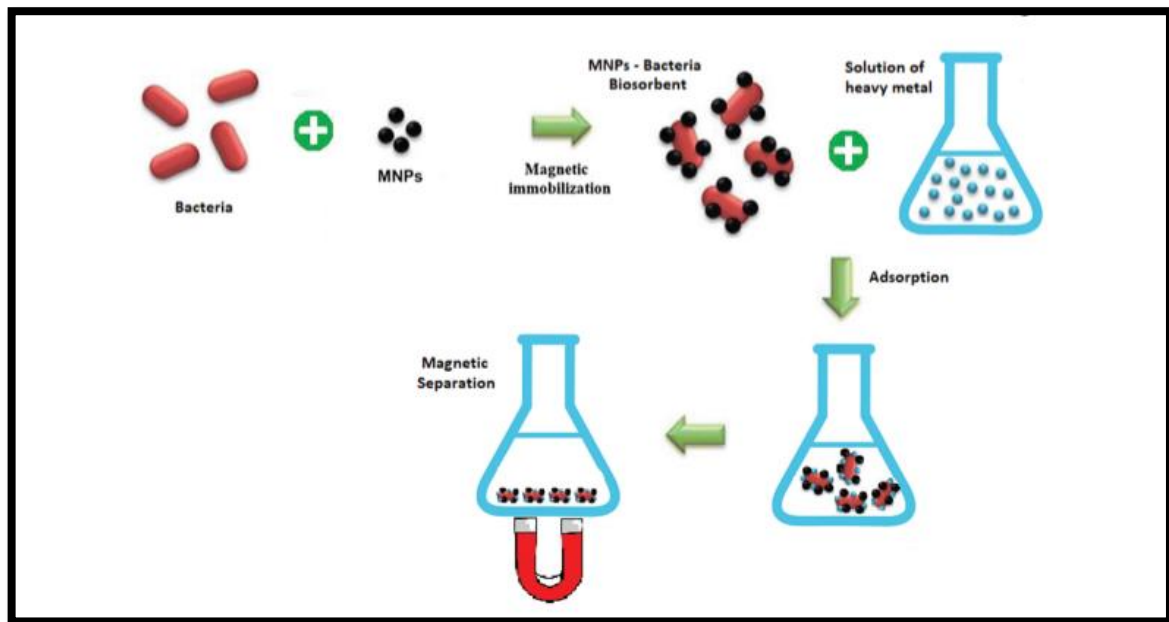


Figure 3.7 : Schémas représente l'adsorption des métaux lourds par des micro-organismes magnétiquement modifiés (Ellen et al.,2020).

3-5-Acclimated activated sludge

Par rapport à la technologie avancée de traitement des eaux usées, le traitement biologique présente des avantages, tels qu'un faible coût et des conditions de fonctionnement douces. Il est donc considéré comme le mécanisme le plus important pour l'élimination des polluants organiques.

A ce jour, la plupart des études ont porté sur la dégradation des EMOP par les boues activées non acclimatées. Les informations sur l'élimination des EMOP par les boues activées acclimatées sont rares. De plus, l'élucidation de la cinétique de dégradation des EMOP par les boues activées acclimatées est très utile pour la conception de l'unité de traitement biologique.

Une fois le processus d'acclimatation terminé, une boue mature et stable a été récoltée pour étudier la dégradation de chaque polluant cible. Les boues récoltées ont été aérées pendant 24 h, puis lavées cinq fois avec un milieu minéral tamponné au phosphate pour éliminer l'éventuel polluant résiduel ciblé. De plus, les produits intermédiaires de dégradation se produisaient généralement dans l'eau en même temps que la dégradation du polluant ciblé.

L'apparition des produits de dégradation à la fin du processus d'acclimatation indique que les produits de dégradation ont une capacité potentielle d'accumulation. Les produits de

dégradation pourraient se produire tant que l'élimination des EMOP dans les stations d'épuration a été observée en comparant la concentration entre affluents et effluents. Sur la base de la capacité potentielle d'accumulation des produits de dégradation trouvée dans cette étude, les produits de dégradation pourraient se produire dans les effluents des usines de traitement des eaux usées.

L'acclimatation des boues activées peut améliorer l'élimination des opérations d'urgence sélectionnées, et davantage d'études devraient être menées pour étudier le devenir des produits de dégradation des opérations d'urgence du point de vue de l'évaluation des risques environnementaux. (Shizong et Jianlong,2017).

3-6-Packed bed bioréacteur :

Les réacteurs à biofilm sont caractérisés par le mode de manipulation des agrégats particule-biofilm. L'un des moyens les plus simples (et les plus anciens) de manipuler ces agrégats se présente sous la forme d'un lit tassé (fixe). Le bioréacteur à lit fixe constitue le dernier système de perfusion. Ils permettent la croissance de cellules en suspension immobilisées dans des microporteurs ou des macroporteurs. Les billes sont placées dans une cuve et le milieu de culture est acheminé en continu, du bas vers le haut, à un débit assez faible pour les maintenir au fond de la cuve. Tout comme dans le cas du bioréacteur à lit fluidisé, les produits cellulaires peuvent être récoltés continuellement (Péloquin et sophi,2019).

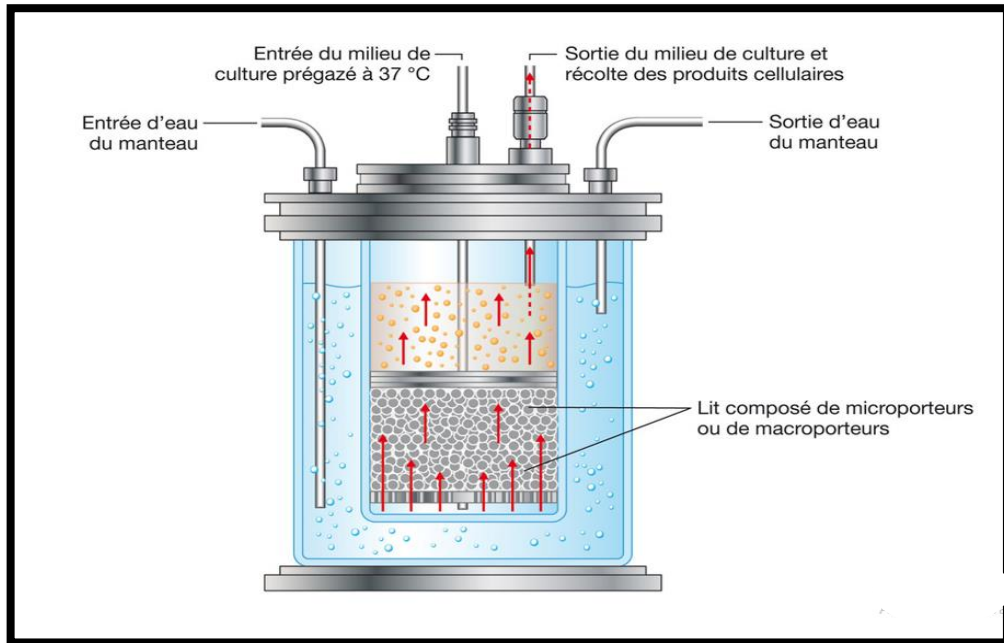


Figure3.8 : Bioréacteur à lit fixe (google).

Conclusion

Conclusion

Le traitement des eaux usées est un processus très important pour la vie quotidienne des habitants des villes et du monde rural. On effectue l'épuration des eaux usées non seulement pour protéger la santé de la population et éviter les maladies contagieuses, mais aussi pour protéger l'environnement. Aujourd'hui, ce dernier but devient de plus en plus important et les techniques de traitement et les stations d'épuration évoluent constamment.

L'objectif principal de cette étude était de rechercher de nouvelles techniques de traitement des eaux usées par des procédés biologiques et de connaître le rôle des micro-organismes dans la décontamination.

Après la recherche, nous avons mis au point des techniques qui ont été récemment utilisées dans la décontamination de l'eau polluée par les polluants émergents à savoir la bioaugmentation et la biostimulation, ainsi que le biosurfactant et l'immobilisation en plus de l'acclimated active sludge et packed bed bioréacteur . Ce sont des bonnes technologies pour une meilleure bioremédiation.

Au final, nous concluons que les principaux moyens de ces approches sont les micro-organismes, qui ont un rôle important dans l'élimination de la pollution de l'eau.

Le développement de méthodes de décontamination moins chères, efficaces et innovantes est actuellement un domaine de recherche actif, comme en témoignent les nombreuses publications paraissant chaque année. La préservation de l'environnement, et en particulier la problématique de la pollution de l'eau, est devenue une préoccupation majeure pour tous, publics, industriels, scientifiques et chercheurs, mais aussi décideurs au niveau national, européen ou international.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

✚ ABDELLY,A.s.d. Bioremédiation / Phytoremédiation. UNIVERSITE DE TUNIS.
<http://pf-mh.uvt.rnu.tn/33/1/SN232.pdf>.

✚ Achab,K ; & Boukais,L.(2016). Contribution à l'étude de la dégradation de polluants par certaines souches bactériennes [Mémoire master, Université Mouloud mammri de Tizi-ouzou].

✚ Benchouk,A.(2017). Bioremédiation des sols pollués de pétrole par les micro-organismes indigènes et amélioration génétique de leur pouvoir [Thèse de doctorat,Université d'Ibn Badis Mostaganem].

✚ Benmahdi,F. (2019). Etude de l'élimination des phosphates des eaux par adsorption sur une smectite intercalée [Mémoire master,Université Abdelhamid ben badis-Mostaganem]. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/12499/Etude%20de%20l%E2%80%99%C3%A9limination%20des%20phosphates%20des%20eaux%20par%20adsorptio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

✚ BENYEROU,D. (2021). Epuration et Réutilisation des eaux résiduaires [Mémoire de Master]. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF].
https://www.univ-usto.dz/wp-content/uploads/2022/05/ERER_DB.pdf.

✚ Bonne, D., R., Castenolz, R. W ., Carrity, G. M.(2001). Bergy's manual of systematic bacteriology, (2).

✚ Bourrier, R., Satin, M., Selmi, B. (2017). Guide technique de l'assainissement : Collecte, épuration, conception, exploitation, 335(5), 1257-9823

✚ Cherif,N.(2016). Production des Biosurfactants par les Microorganismes et leurs Applications. [Thèse de doctorat,Université Djillali Liabes De Sidi Belabbes].
http://rdoc.univ-sba.dz/bitstream/123456789/1215/3/DS_Bio_CHERIF_Nadjib.pdf

Références Bibliographiques

- ✚ Chibane,K .,Djennad,L.(2019). Caractérisation physico-chimique et dosage de quelques métaux lourds de certaines sources d'eau de la région de M'Chedallah wilaya de Bouira [Mémoire master,Université Akli mohand oulhadj-Bouira].
- ✚ Ellen C. Giese, D., Silva, A., Costa,S., Almeida, G., Kelly,C., Dussán, J. (2020) Immobilized microbial nanoparticles for biosorption. *Critical Reviews in Biotechnology*,40(5), 653-666.
- ✚ Farzad,R ; Behnam,A ; Najmeh,Sh ; Peter,M & Eric,D .(2022). A Review on Biotechnological Approaches Applied for Marine Hydrocarbon Spills Remediation.*Microorganisms*,1289(10), 4-9. <https://www.mdpi.com/2076-2607/10/7/1289>
- ✚ Gamoune,S. (2010).Le role des biofilms d'algues dans le traitement biologique des eaux usées [Mémoire magister,Université Farhat abbas-Sétif].
- ✚ Grégorio Crini., Eric Lichtfouse. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, Springer Verlag, 2019, 17 (1), pp 145-155. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02082890/document> .
- ✚ Hébert S., Légaré S. (2000). Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau.
- ✚ Li, J., Jia, Y., Zhong, J., Liu,Q., Li,H., Agranovski,I . (2022). Use of calcium alginate /biochar microsphere immobilized bacteria *Bacillus* sp. For removal of phenol water. *Environmental Challenges*, 9(2), 100-599. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100599>
- ✚ Khaldi,H. (2018). Etude de possibilité d'épuration des eaux usées par un mélange Boues – microalgues. Cas de la station d'épuration Tiaret (Algérie). [Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoune]. <http://dspace.univtiaret.dz:8080/jspui/bitstream.pdf>
- ✚ Khalid,S., Lavania,B ., NareshKumar,Sh .(2021, 24 Février). Bioremediation of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) by Bioaugmentation and Biostimulation in Water

Références Bibliographiques

with Floating Oil Spill Containment Booms as Bioreactor Basin. Environmental Research and Public Health,2226(18),14-18. <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/5/2226>

✚ Kumar Reddy, DH., Lee, SM. (2012). Water Pollution and Treatment Technologies. Environmental & Analytical Toxicology, 103(2), 1-2. <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0525.1000e103>

✚ Margot, J., Magnet, A., Thonney, D., Chèvre, N., de Alencastro, F., Rossi, L. 2011. Traitement des micropolluants dans les eaux usées, Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne), Ed. Ville de Lausanne, 106 pages. www.lausanne.ch/micropolluants

✚ MESSROUK, H. (2011). Contribution à l'évaluation et au traitement des eaux usées dans la région de Ouargla: Cas des composés phénoliques. [Mémoire. Magister]. Univ. KASDI MERBAH Ouargla. 127pages.

✚ METAHRI., Saïd, M. (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. <https://www.ummtto.dz/dspace/handle/ummtto/1515>

✚ Mohamed,S. (2016). Biological and Chemical Wastewater Treatment Processes. Wastewater Treatment Engineering, 212 pages. <https://www.intechopen.com/chapters/49024Environmental>

✚ Nefouci,A.(2015). Bioremediation d'un site pollué par les hydrocarbures :Essais d'application d'un biosurfactant. [Mémoire master,Université de Blida 1].

✚ Nichane, M., Khelil M.A., (2015). Changements climatiques et ressources en eau en Algérie. Vulnérabilité, impacte et stratégie d'adaptation. LARHYSS Journal, Volume 12 (1), 15-23.

✚ Oller,I., Malato, S., Sánchez-Pérez,JA. (2011). Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination—A review. Science

Références Bibliographiques

of the Total Environnement, 409(4), 4141–4166.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.061>

✚ Péloquin, A., Sophi, R., Gilles, CH. (2019). Bioréacteur à lit fixe. manuel *Culture cellulaire* animale et végétale, 121-386 <https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/>

✚ Popoff, MY., Le Minor, L. (2005). Genus XXXIII. Salmonella. Brenner DJ, Kreig NR, Stanley JT. Bergey's Manual Systematic Bacteriology, 2(2), 764-799.

✚ Rahmani, S., Chaibi,S.(2020). Suivi de la qualité physico-chimique des eaux de surface d'Oued Soummam. [Mémoire master, Université Akli mohand oulhadj-Bouira].

✚ Rodier, J., bernard, L., nicole, M. (2016). L'analyse de l'eau, eaux naturelles eaux résiduaires eau de mer, 335(10),569-867.


✚ Sancey,B.(2011). Développement de la bio-adsorption pour décontaminer des effluents de rejets industriels : Abatement chimique et gain environnemental. [Thèse de doctorat, l'université de Franche-Comté]. Theses.fr. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01062560/document>

✚ Saouli, M. (2013). Modélisation et Contrôle d'un bioréacteur à lit fixe. [Mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra]. <https://www.theses-algerie.com/8283287647578029/memoire-de-master/universite-mohamed-khider-biskra/modelisation-et-controle-dun-bioreacteur-a-lit-fixe>

✚ Smith, P.G., Scott, J. S. (2005). Dictionnaire of water and waste management. Butterworth-Heinemann,(2), 480 pages.

✚ Wang S., Wang, J. (2017). Degradation of emerging contaminants by acclimated activated sludge. Environmental Technology, 9 pages.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1345989>

Références Bibliographiques

-  Zahir,B. (s.d). TRAITEMENT DES EAUX USEES PAR DES PROCEDES BIOLOGIQUES CLASSIQUES : EXPERIMENTATION ET MODELISATION. [Mémoire de master, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF UFAS (ALGERIE)]. <http://dspace.univ-setif.dz.pdf>