

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté par

MOULLA Nabil
MESSAOUDI Farida
Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie de L'environnement

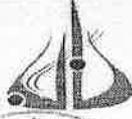
Traitement des eaux usées contaminées par les hydrocarbures dans un bioréacteur à membrane

Soutenu le 01 /07 / 2023

Devant le jury :

| | | | | |
|----------------------------|---------|------|----------------|------------|
| Mr LOUNICI | Hakim | Prof | UAMOB | Président |
| Mr AOUDJIT | Farid | MCA | UAMOB | Examineur |
| Mr SAHNOUNE | Mohamed | MCB | UAMOB | Examineur |
| M ^{me} EL HANAFI | Nawel | MCB | UAMOB | Encadrante |
| M ^{me} IGHILAHRIZ | Kahina | | DCRD Boumerdès | Invité |

Année Universitaire : 2022/2023



التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية



انا الممضي اسفله،

السيد(ة)..... هولي تبيل..... الصفة: طالب (ماستر / دكتوراه)

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية:..... 403299554..... والصادرة بتاريخ 2022-10-16

المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم والعلوم التطبيقية قسم هندسة الطرائق

تخصص:..... هندسة البيئية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها:..... Traitement des eaux usées contaminées par

les hydrocarbures dans un bi réacteur

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023-06-25

توقيع المعني (ة)

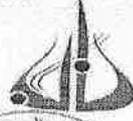
البويرة في 25/06/2023

هيئة مراقبة السرقة العلمية:

الامضاء
رئيس هيئة مراقبة السرقة العلمية
م. المبروراني
25/06/2023

% 23

النسبة:



التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية



انا الممضي اسفله،

السيد(ة) داسعوديا خريذة الصفة: طالب (ماستر / دكتوراه)

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 155.3940.13 والصادرة بتاريخ 2016.04.04

المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم والتكنولوجيا قسم هندسة المراتقا

تخصص: هندسة البيئية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Traitement des eaux usées contaminées par des hydrocarbures dans un bioréacteur à membrane

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

توقيع المعني (ة)

التاريخ: 2023.06.25

البويرة في: 25/07/2023

هيئة مراقبة السرقة العلمية:



% 23

النسبة:

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant qui a guidé nos pas et inspiré nos esprits pour atteindre ce succès "Inchaa Allah". Il nous est difficile d'exprimer en quelques mots notre reconnaissance à notre promotrice, Mme ELHANAFAI Nawel, pour ses conseils et son aide dans notre projet de fin d'études. Nous remercions également notre encadrante à la SONATRACH, Mme K. IGHILAHRIZ, de nous avoir suivi et encadré tout au long du déroulement du mémoire, pour ses conseils avisés, ses encouragements et sa disponibilité toujours présente. Nous tenons à remercier l'équipe SONATRACH (DCRD) de Boumerdès pour leur accueil chaleureux et leur suivi tout au long de notre stage au sein de leur société.

Nous remercions chaleureusement notre Président du Jury, Pr H. LOUINICI, qui a eu l'immense honneur de présider notre Jury, et nous avons eu l'occasion de partager sa longue expérience et surtout d'apprécier ses qualités humaines de patience et de générosité. Nous remercions donc notre Examineur Monsieur M. SAHNOUN d'avoir été notre juré et Monsieur F. AOUDJIT, veuillez trouver un témoignage de notre gratitude et de notre profonde admiration dans ce travail.

Nous tenons également à remercier tous les professeurs du Département Génie des Procédés de l'Université de Bouira, toujours disponibles et aux petits soins pour tous les étudiants, en particulier le responsable du programme Génie de l'Environnement.

Nous sommes très reconnaissants à tous ceux qui nous ont aidés, encouragés et soutenus dans ce modeste travail, de près ou de loin.

Dédicaces

*Au nom de Dieu tout puissant et miséricordieux,
Nulle œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier de
nos proches.*

Je tiens à dédier ce travail à :

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les
sacrifices et toute son assistance et sa présence dans ma vie,*

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance ;

Mon père, qui m'a transmis l'amour du travail et le sens du perfectionnisme et

Qui m'a aidé à avancer dans la vie et me soutenir tout au long de mes études,

Puisse qu'il y trouve le fruit de ses efforts ;

*À mes chères sœurs **Ouazna** et **Sonia**,*

*À mon grand frère **Tarik** et sa femme **Louiza**, ainsi qu'à leurs petites filles*

***Mayline** et **Lina**,*

Qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir, je leurs souhaite une

vie pleine de bonheur et de succès ;

Je le dédie aussi à tous mes amis qui m'ont soutenu de près ou de loin avec ne

serait-ce qu'un mot.

*Je le dédie enfin à mon binôme **Farida**, pour son entente, sa sympathie, sa*

patience, sa confiance et sa compréhension tout au long de ce projet.



MOULLA Nabil

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance :

À l'âme de mon cher père que Dieu lui fasse miséricorde

*Au premier qui a attendu ces moments pour être fier de moi pour m'avoir soutenu
dans la vie*

ma mère, qui m'a motivé avec les hymnes de ses pures prières ;

À mes frères : MOHAMED et ADEL

À mes sœurs : SAADIA, MALIKA et TASSA

*À mon binôme avec qui on a souffert durant la réalisation de ce travail
MOULLA NABIL*

À mes nièces : RAHAF, AYA et ARYAM

À mon oncle paternel SAID

À mon oncle SAID

À tous mes collègues et mes chers amis qui étaient toujours avec moi

À toute ma grande famille MESSAOUDI sans exception



Table des matières

| | |
|--|----|
| Remerciements..... | 2 |
| Dédicaces..... | 3 |
| Liste des matière..... | 5 |
| Liste des figures..... | 9 |
| Liste des tableaux..... | 11 |
| Liste des abréviations..... | 12 |
| Introduction générale..... | 13 |
| Chapitre I : Etude Bibliographique | |
| I-1- Introduction | 16 |
| I-2- Origine des eaux usée | 16 |
| I-2-1- Les eaux usées urbaines ou domestiques..... | 16 |
| I-2-2- Les eaux usées industrielles..... | 16 |
| I-2-3- Les eaux pluviales | 17 |
| I-2-4- Les polluants d'origine agricoles..... | 17 |
| I-3- Pollution par les hydrocarbures pétroliers | 17 |
| I-3-1- Définition..... | 17 |
| I-3-2- Classification | 18 |
| I-3-2-1- Hydrocarbures aliphatiques | 18 |
| I-3-2-2- Hydrocarbures cycliques | 19 |
| I-4- Caractéristiques des eaux usées contenant des HC | 20 |
| I-4-1- Paramètres Physiques-Chimiques..... | 20 |
| I-4-2- Paramètres organoleptiques | 20 |
| I-5- Normes des eaux usées (Normes Algériennes) | 20 |
| I-6- Impact du rejet d'effluents pétroliers non traitées | 21 |
| I-7- Les techniques de traitement des eaux usées..... | 22 |
| I-7-1- Prétraitement..... | 23 |

| | |
|--|----|
| I-7-1-1- Dégrillage | 24 |
| I-7-1-2- Dessablage | 24 |
| I-7-1-3- Déshuilage | 24 |
| I-7-2- Traitement primaire | 25 |
| I-7-2-1- Bassin tampon..... | 25 |
| I-7-2-2- Coagulation / Flocculation | 25 |
| I-7-2-3- Flottation..... | 26 |
| I-8- Traitement secondaire : épuration biologique par les boues activées | 26 |
| I-8-1- Traitement biologique..... | 26 |
| I-8-1-1- Présentation du procédé à boue activée | 26 |
| I-8-1-2- Principe du procédé | 27 |
| I-8-1-3- Traitement de la matière organique | 27 |
| I-8-1-4- Traitement de l'azote | 27 |
| I-8-1-5- Traitement du phosphore | 28 |
| I-8-2- La décantation secondaire | 28 |
| I-9- Traitement tertiaire : Le bioréacteur à membrane (BRM)..... | 28 |
| I-9-1- Principe du BRM..... | 29 |
| I-9-2- Classification de BRM..... | 29 |
| I-9-2-1- Les bioréacteur à boucle externes..... | 29 |
| I-9-2-2- Bioréacteur à boucle immergées..... | 30 |
| I-9-2-3- Description de filtration..... | 32 |
| I-9-3- Avantage du bioréacteur à membrane | 33 |
| I-9-4- Le colmatage dans les bioréacteurs à membrane..... | 34 |
| I-10- Conclusion..... | 36 |
| Chapitre II : Matériels et Méthodes | |
| II-1- Introduction | 38 |
| II-2- préparation des boues | 38 |
| II-2-1- Lavage des boues | 38 |

| | |
|---|----|
| II-2-2- Réactivation des boues | 39 |
| II-3- Etude la cinétique de croissance..... | 42 |
| II-3-1- Dispositif expérimental | 43 |
| II-3-2- Analyse de la croissance bactérienne | 44 |
| II-4- Présentation du pilote (BRM) | 48 |
| II-5- Module membranaire | 51 |
| II-5-1- Caractéristiques du module fibre creuse de type rideau..... | 52 |
| II-5-2- Caractéristiques de la membrane de microfiltration | 52 |
| II-5-3- Conditions de nettoyage | 53 |
| II-6- Traitement de l'eau polluée par le BRM..... | 54 |
| II-6-1- Echantillonnage des eaux | 54 |
| II-6-2- Mis en œuvre le BRM | 54 |
| II-6-3- Méthodologies : Analyses et modes opératoires | 56 |
| II-6-3-1- Analyse physico-chimique | 56 |
| II-6-3-2- Les paramètres de fonctionnement d'un bioréacteur | 59 |

Chapitre III : Résultats et discussions

| | |
|--|----|
| III-1- Introduction | 61 |
| III-2- Caractérisation de la boue | 61 |
| III-3- Réactivation des boues..... | 62 |
| III-4- Etude de la croissance bactérienne..... | 63 |
| III-5- Analyse des paramètres physico-chimique | 66 |
| III-5-1- Variation de la température | 66 |
| III-5-2- Variation de pH..... | 67 |
| III-5-3- Variation de la conductivité électrique CE | 68 |
| III-5-4- Variation de la turbidité | 68 |
| III-5-5- Variation de la matière en suspension (MES)..... | 69 |
| III-5-6- Variation de matière volatile en suspension (MVS) | 70 |
| III-5-7- Variation de la demande chimique en oxygène (DCO) | 71 |

| | |
|---|----|
| III-5-8- Variation de la demande chimique en oxygène la DBO5 | 72 |
| III-6- Les paramètres de fonctionnement d'un bioréacteur | 73 |
| III-6-1- Evolution de L'indice de Mohlman et l'indice de Boue | 73 |
| III-7- Traitement Membranaire..... | 74 |
| III-7-1- Effet de la variation de la pression transmembranaire | 74 |
| III-7-1-1- Effet de la PTM sur la demande chimique en oxygène (DCO) | 74 |
| III-7-1-2- Effet de la PTM sur l'élimination des TPH | 75 |
| III-8- Conclusion | 76 |
| Conclusion générale..... | 77 |
| Référence bibliographiques..... | 79 |
| Résumé..... | 83 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I. 1 : Ancienne structure chimique des hydrocarbures pétroliers | 19 |
| Figure I. 2 : Les étapes de traitement des eaux usées | 23 |
| Figure I. 3 : photo d'un déssableur | 24 |
| Figure I. 4 : Schéma d'un Bioréacteur à boucle externe..... | 30 |
| Figure I. 5 : Schéma d'un bioreacteur à membranes immergées | 31 |
| Figure I. 6 : Schéma d'un bioréacteur immergé externe..... | 31 |
| Figure I. 7 : Filtration frontale | 32 |
| Figure I. 8 : Filtration tangentielle | 32 |
| Figure I. 9 : Schéma des différents mécanismes de colmatage..... | 35 |
| Figure II. 1 : Lavage des boues activées | 39 |
| Figure II. 2 : Filtration des boues activées..... | 39 |
| Figure II. 3 : Réactivation des boues au niveau du laboratoire | 41 |
| Figure II. 4 : Dispositif expérimental des flacons..... | 44 |
| Figure II. 5 : Mesures directes : Dénombrement des bactéries après culture par l'étalement en surface | 45 |
| Figure II. 6 : principe de technique d'étalement en surface | 46 |
| Figure II. 7 : Représente la technique de la dilution..... | 47 |
| Figure II. 8 : Compteur de colonies | 48 |
| Figure II. 9 : Etalement en boites de pétri | 48 |
| Figure II. 10 : Schéma du Bioréacteur à Membrane (Boucle externe)..... | 49 |
| Figure II. 11 : Traitement par boues activées | 50 |
| Figure II. 12 : partie filtration membranaire externe | 51 |
| Figure II. 13 : Module de fibre creuse de type rideau | 52 |
| Figure II. 14 : Pilote expérimental à boues activées BRM..... | 56 |
| Figure II. 15 : pH mètre de marque Adwa AD 1030 mesurer la température et le pH | 57 |
| Figure II. 16 : Conductimètre de marque Cond 1970i..... | 57 |
| Figure II. 17 : Turbidimètre de marque Lovibond TB 300 IR..... | 58 |
| Figure III. 1: Variation de MES pendant la réactivation de la boue | 62 |
| Figure III. 2: variation de MVS pendant la réactivation de la boue. | 63 |
| Figure III. 3: Courbe de développement d'une culture bactérienne. | 64 |
| Figure III. 4: La variation de température. | 66 |
| Figure III. 5: Variations des valeurs de pH. | 67 |
| Figure III. 6: Variation des valeurs de conductivité. | 68 |

| | |
|---|----|
| Figure III. 7: Variation de la turbidité. | 69 |
| Figure III. 8: Variation de la concentration de MES. | 70 |
| Figure III. 9: Variation de la concentration des boues (exprimée en MVS) dans le bassin d'aération et décanteur. | 71 |
| Figure III. 10: Variation de la demande chimique en oxygène (DCO). | 72 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I. 1 : Les normes Algérienne de rejet des eaux usées dans un milieu récepteur (Raffinerie de pétrole) | 21 |
| Tableau I. 2 : Les performances typiques du flottateur | 26 |
| Tableau I. 3 : Avantage du BRM..... | 33 |
| Tableau II. 1 : matériel et réactifs..... | 39 |
| Tableau II. 2 : Composition de solution d'oligo-élément de boues | 44 |
| Tableau II. 3 : Caractéristiques du module fibre creuse de type rideau | 52 |
| Tableau II. 4 : Caractéristiques de la membrane de microfiltration | 52 |
| Tableau II. 5 : Conditions de nettoyage de la membrane | 53 |
| Tableau III. 1: Caractéristiques de la boue activée..... | 61 |
| Tableau III. 2: Représente les résultats de la cinétique de croissance bactérienne. | 64 |
| Tableau III. 3: Variation de la DBO5..... | 73 |
| Tableau III. 4: Valeur de l'indice de Mohlman et l'indice de boue. | 73 |
| Tableau III. 5: Influence des différentes PTM sur la dégradation de la DCO. | 74 |
| Tableau III. 6: Effet de la PTM sur la rétention des hydrocarbures..... | 75 |

Liste des abréviations

BA : Boues Activées

BRM : Bioréacteur à membrane

CE : Conductivité Electrique

DBO5 : Demande Biologique en Oxygène pendent 5 jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

GN : Gélose Nutritive

HC : Hydrocarbure

IB : Indice de Boues

IM : Indice de Mohlman

MES : Matière En Suspension

MO : Matière Oxydable

MO : Matière Organique

MS : Matière Sèche

MVS : Matière Volatile en Suspension

pH : Le potentiel hydrogène

PTM : la pression transmembranaire

PVDF : Polyfluorure de Vinylidène

QR : Débit de recyclage des boues

STEP : Station de Traitement des Eaux Polluées

TPH : Hydrocarbures pétroliers totaux

Introduction Générale

Les eaux usées contiennent de nombreux polluants différents. Ces polluants organiques, inorganiques ou microbiens sont extrêmement dangereux pour l'environnement et la santé humaine. Le type de traitement approprié dépend de la composition des eaux usées. Les eaux usées peuvent être divisées en plusieurs catégories : 1) les eaux usées biodégradables, qui peuvent être transportées directement vers une station de traitement biologique ; 2) les eaux usées récalcitrantes, qui nécessitent une sélection et une adaptation bactériennes avant de pouvoir être traitées par voie biologique ; 3) les eaux usées toxiques et/ou non biodégradables, qui nécessitent un traitement autre qu'un traitement biologique.

Les eaux usées domestiques, les eaux usées municipales ou urbaines et les eaux usées industrielles font partie des trois principales catégories d'eaux usées dont les compositions et les concentrations en polluants varient considérablement.

Les hydrocarbures pétroliers, les huiles et graisses, le phénol, l'ammoniac, le sulfure et d'autres composés organiques sont quelques-uns des nombreux polluants qui composent les eaux usées de l'industrie pétrolière. Dans les eaux rejetées de l'industrie pétrolière, tous ces composés sont présents sous forme très complexe et sont directement ou indirectement nocifs pour l'environnement. Il est nécessaire d'utiliser de nouvelles technologies de traitement des eaux usées pour aider l'industrie pétrolière à préserver l'environnement. Au cours des dernières décennies, les normes de rejet sont de plus en plus strictes, et les stations d'épuration sont confrontées à une demande croissante de réutilisation de l'eau pour réduire la pollution. Cependant, les boues activées conventionnelles, qui sont les processus biologiques les plus courants en tant que traitement secondaire pour les eaux usées industrielles, sont insuffisantes pour répondre à ces strictes exigences. Alternativement, en raison de sa qualité exceptionnelle de l'effluent, de sa faible production de boue et de son encombrement réduit, le bioréacteur à membrane (BRM) combinant un traitement biologique avec la filtration membranaire est considéré comme une technologie prometteuse pour le traitement des eaux usées industrielles.

L'objectif général de ce mémoire est d'étudier, la possibilité de traiter une eau usée synthétique chargé en matière organique (les hydrocarbures) par un bioréacteur à membrane.

Ce mémoire se compose de deux parties :

Première partie : c'est la partie théorique sur un seul chapitre, Il est divisé en trois morceaux :

Nous avons présenté dans le premier morceau des généralités sur les eaux usées ainsi que les principaux contaminants (les hydrocarbures) et leurs conséquences sur l'environnement et l'être humain. Les procédés d'épuration des eaux usées par boues activées sont présentés et décrits dans le deuxième morceau, tandis que les technologies membranaires sont présentées dans le troisième morceau en se concentrant sur les possibilités de traitement par le Bioréacteur à Membrane et son fonctionnement.

Deuxième partie : c'est la partie expérimental et résultats qui va être subdivisée en deux chapitres également.

Le deuxième chapitre présente les divers matériaux et méthodes utilisés dans cette étude. Il ouvre la voie à l'utilisation d'un pilote expérimental adapté pour éliminer simultanément la pollution carbonique de l'hydrocarbure à l'aide d'un processus biologique à boues activé.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et à leurs discussions afin d'évaluer les performances du BRM. En premier lieu, nous avons suivi le comportement de la biomasse le long du traitement biologique jusqu'à sa sortie du décanteur, ensuite nous avons étudié l'efficacité de la membrane en fibre creuse en appliquant trois pressions différentes, pour évaluer l'effet de cette dernière sur la qualité du perméat.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Etude Bibliographique

I-1- Introduction

Les eaux usées, aussi appelées effluents liquides sont des eaux polluées, constituées de toutes les eaux de nature à contaminer par des polluants physiques, chimiques et/ou biologiques ainsi que les eaux qui ont été altérées par l'activité humaine chargées en substances toxiques qui pénètrent dans les canalisations d'assainissement. Il peut donc s'agir d'eaux polluées provenant d'usines ou d'eau ruissellement provenant d'un parc de stationnement. Elles incluent également les eaux de pluies et leurs charges polluantes

Ces eaux sont considérées comme des milieux très complexes, altérés par les activités à la suite d'un usage domestique, industriel, agricole ou autres. Avant leur réutilisation ou injection dans les milieux naturels récepteurs, ils doivent être traités car ils sont considérés comme polluants. C'est pour cette raison, tous les effluents urbains ou industriels subissent des traitements d'abattement ou d'élimination de ces polluants afin de respecter ces différents milieux naturels récepteurs. Il est possible d'effectuer ou réaliser ces traitements de manière collective dans une station d'épuration ou de manière individuelle également par des procédés intensifs ou extensifs [1].

I-2- Origine des eaux usée

Les eaux usées proviennent essentiellement des activités humaines, elles sont d'origine : urbaines, industrielles ou agricoles ainsi que des eaux des précipitations.

I-2-1- Les eaux usées urbaines ou domestiques

Les eaux domestiques proviennent des activités humaines journalières : bains, excréments, préparation des aliments et loisirs. Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales. Ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension [4].

I-2-2- Les eaux usées industrielles

Ce sont les eaux usées qui proviennent de locaux utilisés à des fins industriels, commerciales ou artisanales. Avant leurs rejets vers les réseaux publics, les eaux usées industrielles doivent faire l'objet d'un traitement adapté à leur nature afin d'assurer la protection du milieu récepteur. La composition de ces eaux est liée à l'activité industrielle, on peut catégoriser les établissements industriels sur la base des secteurs d'activité industrielle de la classification SIC (Standard Industriel Classification) en les répartissant en neuf secteurs qui sont :

- Les fabriques de pâtes et papiers ;
- La pollution générée par les industries des raffineries de pétrole ;
- Les industries de la métallurgie primaire ;
- Les industries de chimie (organique et inorganique à l'exception des raffineries de pétrole) ;
- Les industries de transformation du métal (métallurgie secondaire, machinerie, équipements électroniques, matériel de transport, instrument de mesure...etc.) ;
- Les industries agro-alimentaires ;
- Les industries de textile et du vêtement ;
- Les industries de transformation du bois (scieries, fabrication de meubles, ...etc.) ;

Les industries diverses non classées dans les secteurs précédents par exemple (transformation de la pierre, de l'argile, de l'imprimerie...etc.) [4].

I-2-3- Les eaux pluviales

Les eaux de pluie entraînent avec elles les polluants atmosphériques, les poussières, les détritiques, les suies de combustion et les hydrocarbures rejetés par les véhicules, qui s'accumulent dans les rues. Habituellement, ces eaux sont collectées en même temps que les eaux usées, puis dirigées vers les canalisations d'assainissement pour être acheminées vers une station d'épuration. Cependant, il arrive fréquemment que les eaux de pluie soient directement drainées dans les rivières, ce qui entraîne une pollution intense du milieu aquatique [5].

I-2-4- Les polluants d'origine agricoles

Ces effluents proviennent des terres cultivées après lessivages et ruissellement. Ces eaux sont riches en éléments fertilisants (azote et phosphore) et en polluants organiques (pesticides) [4].

I-3- Pollution par les hydrocarbures pétroliers

I-3-1- Définition

Les hydrocarbures sont des composés organiques contenant exclusivement des atomes de carbones (C) et d'hydrogène (H). Le terme « hydrocarbure pétrolier (HCP) » est un terme générique qui désigne les mélanges de composés organiques présents dans des matières géologiques comme l'huile, le bitume et le charbon ou dérivés de ces matières. Ces produits

pétroliers contiennent généralement entre des centaines et des milliers de composés dans des proportions variables [6].

I-3-2- Classification

Les hydrocarbures constituent la fraction la plus importante d'un brut pétrolier, ils représentent entre 65 et 95 % de la plupart des pétroles bruts [6]. Les pétroles bruts sont constitués de différentes familles de composés dont la composition chimique varie énormément selon leur origine géographique et géologique [7]. Les composés pétroliers peuvent être classés en quatre familles principales qui sont présentés en proportions variables selon l'origine : les hydrocarbures saturés (30 à 70 %), les hydrocarbures aromatiques et poly-aromatiques (20 à 40 %), les composés polaires (5 à 25%) et les asphaltées (0 à 10 %) [8]

I-3-2-1- Hydrocarbures aliphatiques

Parmi les hydrocarbures aliphatiques on distingue [8]:

a. Alcanes linéaires

Les alcanes linéaires (n-alcanes, C_nH_{2n+2}), dont la longueur de leur chaîne varie de 7 à 40 atomes de carbone constituent une des classes les plus abondantes (10 à 40 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier).

b. Alcanes ramifiés

Les alcanes ramifiés les plus abondants sont les iso-alcanes (groupement méthyle en position 2). Les autres composés ramifiés antis (groupement méthyle en position 3) ou poly-ramifiés tels que les isoprénoides (exemple : prestance, prytane) sont beaucoup moins nombreux. Ces composés se trouvent dans le pétrole brut à des proportions sensiblement égales à celles des n-alcanes.

c. Cyclo alcanes

Les cyclo alcanes renferment des composés cycliques (à 5 ou 6 atomes de carbone) saturés et le plus souvent substitués. Quelques dérivés polycycliques sont aussi présents et certains d'entre eux tels que les stéranes et les triterpanes sont caractéristiques d'un pétrole brut. Cette famille peut représenter entre 30 et 50 % des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut.

I-3-2-2- Hydrocarbures cycliques

Plusieurs familles d'hydrocarbures aromatiques et poly-aromatiques dont le nombre de noyaux varie de 2 à 6 sont présentes dans les pétroles bruts. Ces composés sont dominés par des composés mono-, di- et tri-aromatiques. En général, les hydrocarbures aromatiques sont moins abondants que les alcanes, et ne représentent que 10 à 30 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier [8].

a. Composés polaires Les composés polaires correspondent à des molécules hétérocycliques, telles que :

- ✚ Des composés oxygénés : phénols, acides carboxyliques, alcools, aldéhydes, ...
- ✚ Des composés soufrés : mercaptans, sulfures, disulfures, ...
- ✚ Des composés azotés : pyridines, quinoléines,

Les dérivés soufrés sont dans la plupart des cas plus abondants que les composés oxygénés ou azotés.

b. Asphaltènes

Les asphaltènes correspondent à une classe de composés de hauts poids moléculaires, insolubles dans le pentane ou l'hexane. La structure de ces composés est mal connue du fait, d'une part de leur composition chimique complexe (à base de cycles aromatiques condensés, de naphthé-romatiques, de ramifications et d'hétéroatomes (O, N, S), et d'autre part de méthodes analytiques difficilement utilisables. La **figure I.1** résume la structure chimique des hydrocarbures pétroliers.

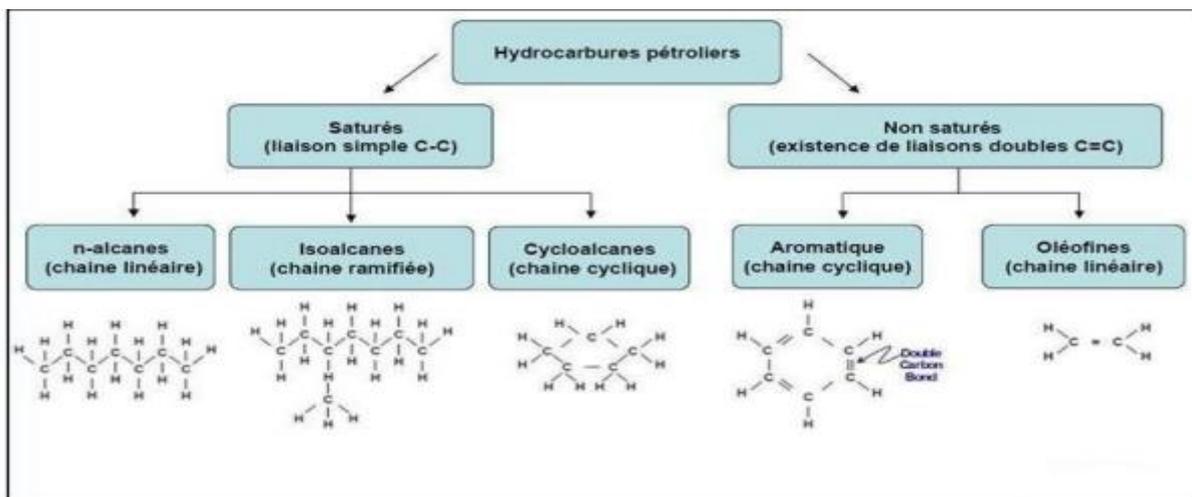


Figure I. 1 : Ancienne structure chimique des hydrocarbures pétroliers [2]

I-4- Caractéristiques des eaux usées contenant des HC

Pour traiter un problème de pollution des eaux usées industrielles rejetées vers l'environnement ou destinées pour un éventuel recyclage, il est nécessaire de définir et d'évaluer les éléments susceptibles d'altérer la qualité de ces eaux ainsi que les paramètres caractéristiques de la pollution de ces eaux [3].

I-4-1- Paramètres Physiques-Chimiques

- Hydrocarbures (HC) ;
- La température ;
- Le potentiel Hydrogène (pH) ;
- La conductivité électrique (CE) ;
- La matière en suspension (MES)
- Les matières volatiles en suspension (MVS) ;
- Les matières minérales sèches (MMS) ;
- La Demande Chimique en Oxygène (DCO) ;
- La Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅).

I-4-2- Paramètres organoleptiques

- Couleur ;
- La turbidité ;
- Odeur.

I-5- Normes des eaux usées (Normes Algériennes)

Les eaux usées qui sont collectées dans les réseaux urbains ou les eaux usées directement émises par les industries, ne doivent être rejetées dans un milieu récepteur naturel (rivière, lac, littoral marin, ou terrain d'épandage) que s'ils respectent les normes établies par des réglementations. Le Décret exécutif n° 93-160 du 10 Juillet 1993, publié au Journal Officiel de la République Algérienne réglementant les rejets d'effluents liquides, et fixe les valeurs limitent de ce rejet. Un nouveau décret réglementaire a renforcé ces mêmes valeurs : le Décret Exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 Avril 2006, section 1, articl. Les valeurs limites maximales de rejet d'effluents fixées par ces deux décrets sont regroupées dans le tableau ci- dessous [13].

*Tableau I. 1 : Les normes Algérienne de rejet des eaux usées dans un milieu récepteur
(Raffinerie de pétrole) [12]*

| Paramètres | Unité | Valeurs limites | Tolérance aux valeurs limites anciennes installations |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--|
| Température | °C | 30 | 35 |
| pH | - | 5,5 - 8,5 | 5,5 - 8,5 |
| DBO₅ | mg O ₂ /L | 25 | 30 |
| DCO | // | 100 | 120 |
| MES | mg/L | 25 | 30 |
| Azote total | // | 20 | 25 |
| Huiles et graisses | mg/L | 15 | 20 |
| Phénol | g/t | 0,25 | 0,5 |
| Hydrocarbures | g/t | 5 | 10 |
| Plomb | mg/L | 0,5 | 1 |
| Chrome III⁺ | // | 0,05 | 0,3 |
| Chrome VI⁺ | // | 0,1 | 0,5 |

I-6- Impact du rejet d'effluents pétroliers non traitées

Les principaux contaminants trouvés dans les effluents pétroliers sont des hydrocarbures, des phénols, des composés soufrés, des composés azotés et de MES. Les hydrocarbures pétroliers contiennent des polluants organiques persistants (POP). Certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dont le Benz(a)pyrène, sont particulièrement toxiques pour la vie aquatique.

Les HAP sont des molécules persistantes en raison de leur faible biodégradabilité et de leur stabilité dans l'environnement. Le rejet d'eaux usées pétroliers non traitées contenant des matières organiques élevées entraîne une consommation excessive d'oxygène par les bactéries dans les plans d'eau. La quantité minimale d'oxygène dissous nécessaire pour une vie normale dans un milieu aquatique est d'environ 2 mg/ L. Cette réduction d'oxygène dans l'eau entraîne la mort des organismes vivants. De plus, la disponibilité de l'oxygène est importante car les produits finaux des réactions chimiques et biochimiques dans les systèmes anaérobiques produisent souvent des goûts, des odeurs déplaisant sur le plan esthétique [11]. Les composés phénoliques ont des effets toxiques aigus sur les poissons [9]. Ils constituent une menace pour l'environnement en raison de leur stabilité, de leur bioaccumulation et leur capacité à rester dans le milieu récepteur pendant de longues périodes. Ils sont également cancérigènes, causant des dommages considérables et menaçant l'écosystème des plans d'eau ainsi que la santé humaine [10].

L'eutrophisation, entraînée par l'excès d'azote, peut entraîner des proliférations d'algues potentiellement toxiques et une baisse de la biodiversité. La destruction de la faune et de la flore aquatique rend impossible l'utilisation bénéfique des cours d'eau (par exemple pour les loisirs, le tourisme, la pêche et l'agriculture, etc.)

Les eaux usées sont généralement formées du sous-produit d'une utilisation humaine, qu'il s'agisse d'utilisation domestique, industrielle ou agricole d'où l'usage de l'expression eaux usées. Ces derniers sont caractérisés par des matières polluantes comme la pollution particulaire, qui limite la vie des organismes photosynthétiques et entraîne des dépôts et des envasements dans les cours d'eau. La faune existante est modifiée et parfois disparue lorsque la matière organique dans les eaux usées diminue la teneur en oxygène dissous. Dans un souci de protéger les milieux récepteurs, des traitements sont effectués sur ces effluents recueillis par le réseau d'assainissement urbain, elles sont acheminées et transportées vers une station d'épuration où elles sont soumises à plusieurs étapes d'épuration.

I-7- Les techniques de traitement des eaux usées

Une station d'épuration comprend obligatoirement deux filières de traitement, la filière eau et la filière boue. Les résidus générés de cette dernière, sont traités et déshydratés avant leur évacuation dans la filière eau, l'eau est débarrassée de différents polluants avant son rejet dans le milieu naturel. Comprend généralement [14] :

- Un prétraitement qui permet d'éliminer de l'eau, les matières en suspension (déchets grossiers, sables...) et les huiles.
- Un traitement primaire qui permet aux matières en suspension de se déposer par simple gravité sous forme de boues.
- Un traitement secondaire élimine les matières en solution dans l'eau (matières organiques, substances minérales...).
- La clarification (décantation secondaire)
- Certaines stations sont également équipées d'un traitement tertiaire et il s'agit d'un traitement complémentaire ou « affinage » dans le but, soit d'une réutilisation à des fins industrielles ou agricoles, soit de la protection du milieu récepteur pour des usages spécifiques

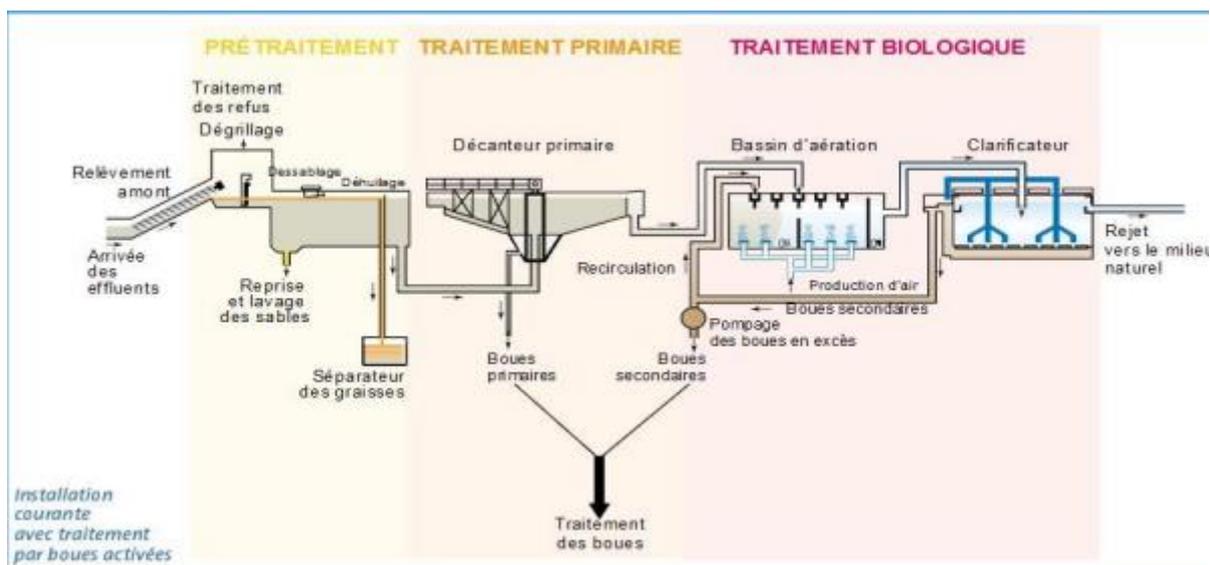


Figure I. 2 : Les étapes de traitement des eaux usées [15]

I-7-1- Prétraitement

Le prétraitement est un 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) [16].

I-7-1-1- Dégrillage

Il est nécessaire de procéder au dégrillage pour retirer de gros objets qui pourraient entraver les procédés en aval. Il permet de séparer et d'évacuer les matières et les matériaux volumineux, transportés par l'effluent à traiter. L'efficacité de ce traitement dépend essentiellement de l'écartement des barreaux des grilles qui sont de trois types [17] :

- Dégrillage fin (écartement 3 à 10 mm) ;
- Dégrillage moyenne (écartement 10 à 25 mm) ;
- Dégrillage grossier (écartement 50 à 100 mm).

I-7-1-2- Dessablage

Le dessablage est utilisé pour éliminer les graviers, les sables et les particules minérales de l'effluent à traiter, réduisant ainsi le risque d'abrasion des équipements mais aussi de diminuer les dépôts et le colmatage dans les conduites. Le dessablage est une opération de décantation des particules grenues. Les sables sont également évacués dans les centres d'enfouissement technique ou CET. Cependant, grâce aux systèmes actuels, ils peuvent être recyclés via le lavage et la classification [18].



Figure I. 3 : photo d'un déssableur [19]

I-7-1-3-Déshuilage

Il consiste à retirer les matières flottantes en surface. Les matières grasses sont séparées de l'eau à l'aide d'une injection de bulles. La séparation liquide-liquide est appelée déshuilage, tandis que la séparation solide-liquide est appelée dégraissage. Les matières ainsi recueillies seront incinérées ou mises en décharge, ce qui pourrait compromettre le processus de

traitement biologique. Il existe une variété de dispositifs de déshuilage-dégraissage conçus en fonction de la nature de l'eau à traiter. Il arrive fréquemment que les opérations de dessablage et de déshuilage soient combinées dans un même ouvrage. Dans la partie aval des déssableurs, des aérateurs mécaniques à fines bulles favorisent la flottation des écumes. Le pont roulant est également équipé d'un racleur de surface qui oriente les écumes, qui sont principalement composées d'huiles et de graisses, vers les bassins de stockage. Les écumes peuvent être acheminées vers les bassins de stockage afin que les boues les déshydratent v [19].

I-7-2- Traitement primaire

Le traitement "primaire" fait appel à des procédés physiques (Flottation), ainsi que des procédés physicochimiques, tels que la coagulation- floculation [20].

I-7-2-1- Bassin tampon

Pour un bon fonctionnement des étapes qui suivent, le bassin tampon permet d'équilibrer l'effluent issu du déshuilage primaire afin d'absorber les variations de charge. Il dispose d'un système de brassage pour garantir une homogénéisation de son contenu. Ce brassage est généralement réalisé par aération. De plus, sa fonction consiste à maintenir une température de sortie inférieure à 40 °C, qui est nécessaire pour la flottation et le traitement biologique [20].

I-7-2-2- Coagulation / Floculation

La coagulation est utilisée car les matières colloïdales sont très stables en suspension et naturellement non décantables. En réduisant leurs forces de répulsion électrostatique, il est possible de favoriser l'agglomération des colloïdes afin de déstabiliser la suspension. La coagulation s'obtient par addition dans l'eau d'un réactif chimique : comme le sel d'aluminium ou de fer qui neutralise les charges électriques superficielles répulsives, et permet ainsi leur agglomération. Celle-ci est accélérée par le phénomène de 'La floculation' qui a pour but d'augmenter la probabilité de contact entre les particules pour enfin augmenter le taux d'agglomération. L'agglomération des particules déchargées en microflocs puis en flocs volumineux et décantables est connue sous le nom de floculation [20].

I-7-2-3- Flottation

Elle sert à éliminer les colloïdes rassemblés en floccs et les hydrocarbures dispersés présents dans l'eau prétraitée à l'entrée du traitement biologique (**tableau I.2**). Elle est réalisée avec des flottateurs mécaniques ou à air dissous [21]

Tableau I. 2 : Les performances typiques du flottateur [21]

| PARAMETRES | ENTREE | SORTIE |
|--------------------------|----------------|-----------------|
| Huiles insolubles (mg/L) | ≤200 max | 10 En moyenne |
| MES (mg/L) | ≤200 max | < 30 En moyenne |
| | 100 en moyenne | |

I-8- Traitement secondaire : épuration biologique par les boues activées

Le traitement secondaire comprend deux phases : le traitement biologique et la décantation secondaire qui permettent l'élimination de la matière dissoute dans l'eau (minérale et organique) et le dégazage de l'azote.

I-8-1- Traitement biologique

I-8-1-1- Présentation du procédé à boue activée

Le principe des boues activées réside dans une intensification des processus d'autoépuration que l'on rencontre dans les milieux naturels. Il est basé sur une culture bactériologique très active mélangée avec des eaux usées, qui garantit la dégradation aérobie de la matière organique, dans le bassin d'aération. La biomasse ainsi formée constituant la phase solide est éliminée par décantation dans le décanteur secondaire [20].

I-8-1-2- Principe du procédé

Le traitement consiste donc à provoquer le développement de floccs bactériens (bactéries hétérotrophes) dans un bassin alimenté en eau usée (bassin d'aération), en brassant suffisamment le milieu pour éviter la décantation des boues et en fournissant l'oxygène nécessaire à la prolifération des micro-organismes. En se nourrissant principalement des composés carbonés présents dans la pollution amenée, ainsi que de l'azote (nitrification/dénitrification) et du phosphore, ces boues permettent de dégrader rapidement les matières biodégradables [22].

I-8-1-3- Traitement de la matière organique

Les matières organiques sont dégradées par des micro-organismes, tels que les bactéries, qui consomment ces matières organiques en présence d'oxygène (méthode aérobie) ou en l'absence d'oxygène (méthode anoxie) [22].

Méthode aérobie :



Méthode anoxie :



I-8-1-4- Traitement de l'azote

Le processus de dégradation se fait en deux étapes : Nitrification-Dénitrification.

a. Nitrification

Elle est effectuée dans un bassin en aérobie par les bactéries autotrophes en deux phases successives ;

1-Phase de nitrification avec la transformation de l'azote ammoniacal (NH_4^+) en nitrites (NO_2^-) :



2-Phase de nitrification avec la transformation des nitrites (NO_2^-) en nitrates (NO_3^-) :



b. Dénitrification

La dénitrification est un processus par lequel certaines bactéries réduisent les nitrates en azote gazeux. Les plus couramment utilisées sont les bactéries hétérotrophes. C'est un procédé anoxie qui a lieu en absence d'oxygène mais en présence de forme oxydés de l'azote [23].



I-8-1-5- Traitement du phosphore

En déphosphatation biologique, le phosphore de l'eau brute est incorporé dans la biomasse cellulaire (suraccumulation du phosphore), puis évacué du système avec les boues en excès. La teneur en phosphore est de l'ordre de 2% par gramme de biomasse dans une boue activée classique, tandis que dans une boue activée déphosphatante la teneur en phosphore peut atteindre 8 à 10% par gramme de biomasse. Le bassin sera toujours suivi d'un clarificateur qui assurera la séparation de l'effluent épuré et des boues. Celles-ci seront recyclées dans le bassin d'aération pour en assurer la concentration permanente et la masse produite en excès sera dirigée vers le traitement des boues [20].

I-8-2- La décantation secondaire

Le clarificateur est un bassin circulaire, équipé d'un point racleur. Par décantation, la liqueur mixte provenant des bassins biologiques via la deuxième chambre de répartition est séparée en eau épurée et boues biologiques. Une pompe à vide siphonne les boues décantées, une partie sera acheminée vers la première chambre du répartiteur assurant la recirculation des boues contenant la culture bactérienne épuratrice. L'autre partie sera transférée au flotateur afin de maintenir la concentration en biomasse nécessaire dans ce bassin [24].

I-9- Traitement tertiaire : Le bioréacteur à membrane (BRM)

La technique du bioréacteur à membrane (BRM) est une combinaison d'un procédé de boues activées et d'une filtration sur membrane. À la fin des années soixante, la notion de l'utilisation combinée des membranes et des boues activées est apparue. La technique a beaucoup évolué en fonction de la nature des membranes utilisées (sélectivité, résistance...), et son application a considérablement augmenté au cours des dix dernières années.

Le BRM résiste mieux aux changements de charge et garantit une qualité constante de l'effluent à la sortie de la filière de traitement. Le BRM est une installation d'épuration qui

exécute simultanément deux tâches : l'épuration biologique et la clarification. Ainsi, l'élimination des polluants dissous et particulaires permet d'obtenir une eau traitée d'excellente qualité pouvant être réutilisée pour un certain nombre d'applications (arrosage des espaces verts, lavage des rues, fontaines, arrosage des golfs, etc.) [25].

I-9-1- Principe du BRM

Un BRM associe une membrane d'ultrafiltration (0,1 – 0,01 μ m) ou de microfiltration (1 - 0,1 μ m) à un procédé de boues activées dans le réacteur biologique. Le placement des membranes directement dans le bassin d'aération ou dans un compartiment à part, présente d'importantes conséquences pour le procédé. Ces membranes assurent la rétention de la matière en suspension (MES) et des bactéries dans le bassin d'aération.

Comme la membrane représente une barrière physique pour les bactéries et autres solides dans le bassin, la défloculation et les bactéries filamenteuses n'ont plus d'effet négatif sur la qualité de l'eau traitée. Des conditions opératoires (température, aération, dénitrification, charge à traiter) susceptibles de modifier l'aptitude à la décantation de la suspension et plus spécifiquement son aptitude à la floculation ne vont ainsi plus perturber les performances de la séparation ce qui peut minimiser les inconvénients présents dans le système classique des boues activées. Le couplage d'une séparation membranaire avec la boue activée offre une vraie synergie [26].

I-9-2- Classification de BRM

On distingue deux familles selon la configuration : les bioréacteurs à boucle externe et les bioréacteurs à membranes immergées.

I-9-2-1- Les bioréacteur à boucle externes

Dans une première génération de BRM, les bioréacteurs à membrane externe, sont aussi appelés « systèmes recirculés », puisque la liqueur mixte est pompée du bassin aéré vers le module de filtration placé à l'extérieur du bioréacteur (**figure I.4**). Le retentât qui contient les molécules ou particules retenues est renvoyé vers le bassin d'aération [26].

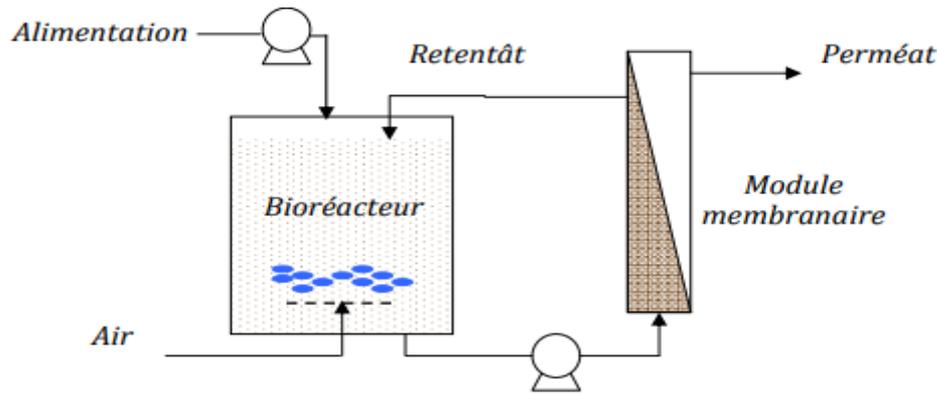


Figure I. 4 : Schéma d'un Bioréacteur à boucle externe [27]

La mise en œuvre de la filtration interne et externe est tangentielle. La vitesse de circulation doit être élevée (2 à 5 m/s) afin de créer des contraintes de cisaillement qui entravent le développement du colmatage par dépôt, pour conduire à des valeurs élevées de flux de filtrat. Les modules plans ou tubulaires sont les plus couramment utilisés. Les flux obtenus sont de l'ordre de 50 à 120 L/h.m². Leurs inconvénients sont principalement le taux de cisaillement important subi par la biomasse ainsi que la consommation énergétique relativement élevée (de l'ordre de 10 à 50 kWh/m³).

I-9-2-2- Bioréacteur à boucle immergées

Dans la seconde génération, le module de membrane est immergé dans le bassin d'aération (**figure I.5**). Le perméat est soutiré par aspiration ce qui évite de pressuriser le bioréacteur. Ainsi la pression transmembranaire sera inférieure à 1 bar, en conséquence la dépense énergétique associée au BRMI est de l'ordre de 0,2-0,4 kWh/m³[28].

Les modules utilisés sont généralement des membranes planes ou des fibres creuses (la filtration a lieu de l'extérieur de la membrane vers l'intérieur des fibres). En raison de la faible vitesse du liquide au voisinage de la membrane, la filtration utilisée dans les BâMI est de type frontal.

Les flux typiques pour des fonctionnements à long terme se situent entre 5 – 20 L /h m² [25]. Une aération par des grosses bulles est employée comme méthode mécanique pour prévenir, limiter et contrôler les dépôts et le colmatage. L'air est introduit au-dessous de la membrane et distribué uniformément pour maximiser l'action d'érosion de l'air à la surface de membrane.

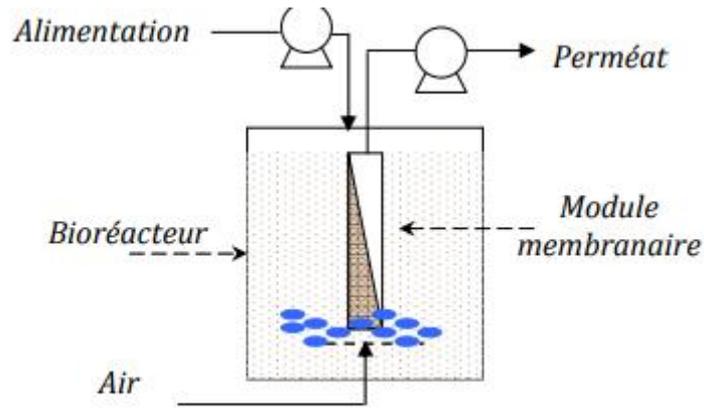


Figure I. 5 : Schéma d'un bioréacteur à membranes immergées [25]

Un nouveau bioréacteur (**figure I.6**), classé dans la catégorie des configurations internes, a récemment été développé. Il résulte d'un compromis entre les BRM à boucle externe et les BRMI. Les membranes sont immergées dans un carter placé à l'extérieur du bioréacteur, facilitant les opérations de maintenance (inspections, l'entretien nettoyage chimique). La filtration est semifrontale, avec une très légère vitesse de circulation créée par un recyclage de la biomasse à faible débit. Les membranes utilisées sont généralement des fibres creuses. Dans cette configuration l'aération, nécessaire au métabolisme de la biomasse et à l'agitation des fibres, est découplée et ainsi optimisée. La séparation de l'unité de filtration du bioréacteur pourrait être bénéfique en cas d'une élimination avancée des éléments nutritifs.

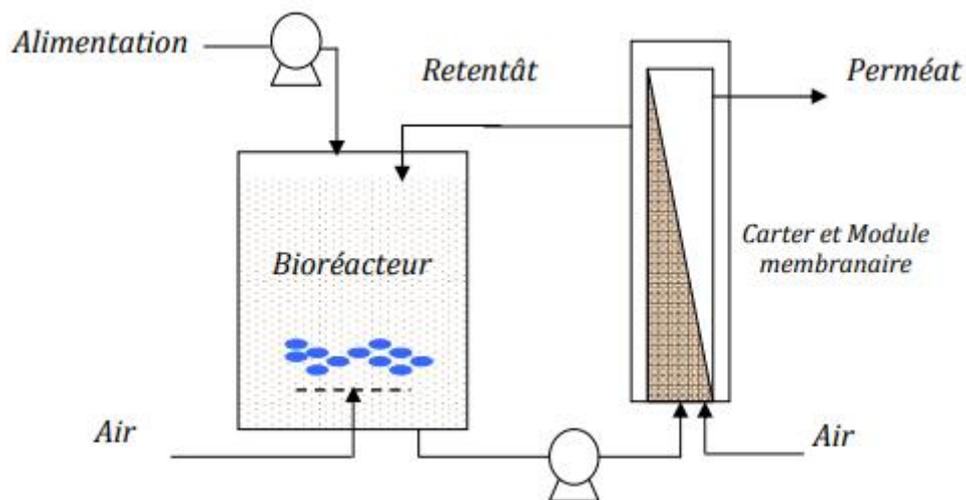


Figure I. 6 : Schéma d'un bioréacteur immergé externe [25]

I-9-2-3-Description de filtration

Il existe deux modes standards de fonctionnement des membranes, la filtration frontale (**figure I.7**) et la filtration tangentielle (**figure I.8**) [29] :

a- Le mode frontal

Il existe deux courants distincts, la solution d'alimentation et le filtrat ou perméat. Une pression du côté alimentation est utilisée pour faire passer la solution d'alimentation perpendiculairement à la surface de la membrane. Dans ce mode de filtration, les espèces sont retenues continuellement à la surface ce qui entraîne la formation d'un dépôt et par conséquent une diminution rapide du flux de perméation au cours du temps.

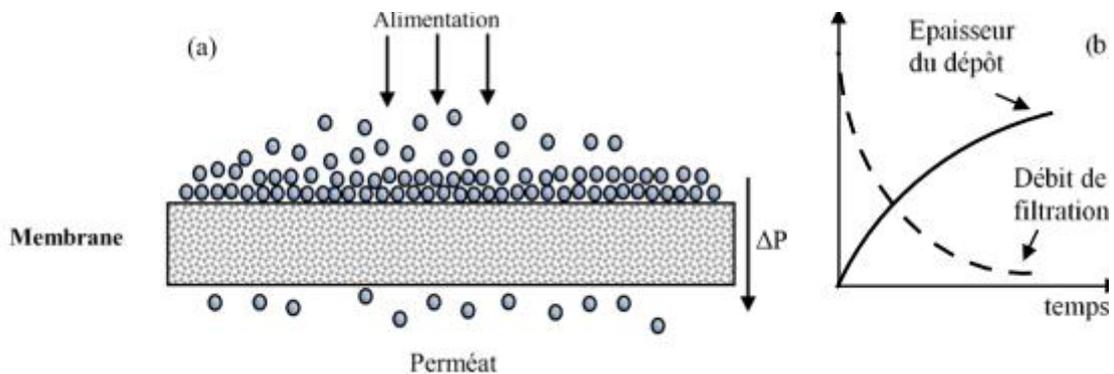


Figure I. 7 : Filtration frontale [29]

b- Le mode tangential

Le flux d'alimentation est continu et parallèle à la surface de la membrane. Dans ce cas, on distingue, trois courants : la solution d'alimentation, le retentât ou concentrât et le perméat. La solution d'alimentation circule tangentielle à la surface de la membrane et pénètre à travers la membrane grâce à la différence de pression. La contrainte tangentielle associée à la vitesse de circulation permet de réduire la formation du gâteau de filtration et de le minimiser.

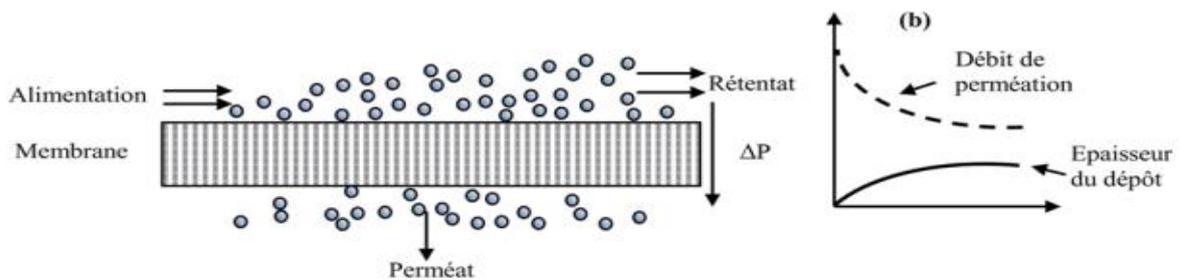


Figure I. 8 : Filtration tangentielle [29]

I-9-3- Avantage du bioréacteur à membrane

Aujourd'hui, on suppose que les utilisateurs de traitement des eaux sont d'accord sur le fait que l'application des technologies membranaires a prouvé son utilité dans le domaine du traitement des eaux usées. En effet, les modules membranaires présentent de nombreux avantages par rapport à un procédé de traitement conventionnel par boues activées. Ces avantages peuvent être répartis en 3 catégories majeures : l'installation, l'exploitation et le procédé (**tableau I.3**). En ce qui concerne l'installation, les BRM ne nécessitent pas de bassin de décantation (contrairement à une boue activée classique). Ils sont donc plus compacts (la surface au sol pouvant être divisée par un facteur 5) et ils ont une probabilité plus élevée d'être positionnés dans des zones plus restreintes. De plus, les BRM ont l'avantage d'être modulaires. Il est simple d'augmenter ou de diminuer la surface de la membrane impliquée (en particulier pour les bioréacteurs à membranes externes). Ce procédé peut être facilement intégré dans des installations existantes qui disposent déjà de réacteurs biologiques, comme lors de la rénovation d'anciennes stations de traitement, où les décanteurs peuvent être transformés en bassins tampons [25].

Tableau I. 3 : Avantage du BRM [25]

| Catégories | Caractéristiques | Avantage |
|--------------|------------------|--|
| Installation | Compacité | Modularité Adaptabilité pour l'amélioration d'installations existantes |
| Exploitation | Fiabilité | Excellente qualité de l'eau traitée |
| Procédé | Qualité de l'eau | Meilleure élimination de DCO, DBO ₅ , Azote et Phosphore Clarification et désinfection quasi-totale (bactéries, virus) Possibilité de réutilisation de l'eau traitée |
| | Biomasse | Rétention totale de biomasse Age de boues élevées et découplé du temps de séjour hydraulique Capacité à traiter des composés récalcitrants (phénols) Faible production de boues excédentaires Forte concentration de biomasse dans le réacteur (usuellement 8 à 15 g/L). |

Le colmatage et la polarisation de concentration sont considérés comme des limites importantes qui tendent à réduire les performances des membranes. La présence et l'accumulation de composés au voisinage de la membrane provoque le phénomène de polarisation de concentration. La couche de polarisation de concentration peut être rapidement éliminée en diminuant la pression transmembranaire ou en arrêtant la filtration, ce qui signifie que le phénomène est réversible. Il existe trois types de colmatage différents.

- ✚ Il peut s'agir de l'adsorption des composés sur le matériau membranaire avec lequel se créent de fortes interactions.
- ✚ Lorsque les composés à filtrer sont de taille inférieure à celle des pores de la membrane (comme les macromolécules présentes dans les BRM), un colmatage en profondeur peut se produire.
- ✚ La troisième forme de colmatage est le dépôt de particules à la surface de la membrane, ce qui peut générer un gâteau plus ou moins compact.

Dans la plupart des cas, le colmatage des BRM est généralement une combinaison de ces trois formes. Afin de restaurer les capacités de filtration de la membrane, un lavage chimique est nécessaire après le colmatage par adsorption. Lorsque la technologie des membranes le permet (comme dans les membranes à fibres creuses), le rétrolavage peut éliminer le dépôt de particules et le blocage des pores. Pour les autres technologies membranaires, le lavage chimique s'impose. Le lavage chimique consiste à utiliser une solution acide (par exemple l'acide citrique) pour éliminer le colmatage dû à la matière inorganique et un oxydant (par exemple une solution de NaOCL) pour oxyder la matière organique.

I-9-4- Le colmatage dans les bioréacteurs à membrane

L'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane est appelé colmatage. Il entraîne soit une diminution du flux de perméat pour une filtration à pression constante, soit une augmentation de la pression transmembranaire pour une filtration à flux de perméat constant. Il s'agit de phénomènes physiques, chimiques et biologiques se produisant à l'interface membrane/milieu biologique. Il peut être de nature inorganique (dépôt de particules, de CaCO_3 , de précipité de sels,) et/ou organique (Biofilm). La prévision du colmatage est toujours difficile en raison de la complexité des mécanismes de colmatage dans le processus BRM [30].

Le milieu présent dans les bioréacteurs à membrane est communément appelé boue activée ou liqueur mixte. Cette liqueur mixte est un milieu non homogène composé des diverses populations de bactéries, des matières en suspension, des macromolécules, des ions pouvant former des complexes avec les molécules organiques, des petites molécules organiques ou minérales. Chaque élément peut contribuer au colmatage des membranes. La partie liquide ou surnageant de la liqueur mixte (composée de colloïdes et de substances dissoutes) est généralement la plus impliquée dans le colmatage. Les substances dissoutes proviennent à la fois de l'effluent à traiter mais aussi du métabolisme bactérien. En particulier, il y a quelques polymères extracellulaires tels que (sucres, protéines, acides humiques...) qui sont considérés comme des substances ayant un fort pouvoir colmatant.

Il existe généralement deux catégories principales de fermeture. Le premier type de colmatage, appelé colmatage réversible, peut être éliminé in situ par des techniques mécaniques telles que l'utilisation de grosses bulles d'air, ou par rétro-lavage à l'eau (filtration sous pression de perméat en sens inverse de la filtration pour les BRMI,) ou l'augmentation de la vitesse tangentielle le long de la membrane (pour les BRME). En revanche, le colmatage irréversible nécessite un lavage chimique de la membrane.

Hermia (1982) a proposé une classification plus précise des types de colmatage basée sur la comparaison entre la taille des pores de la membrane et celle des particules. Cette classification reste aujourd'hui très utilisée (**figure I.9**).

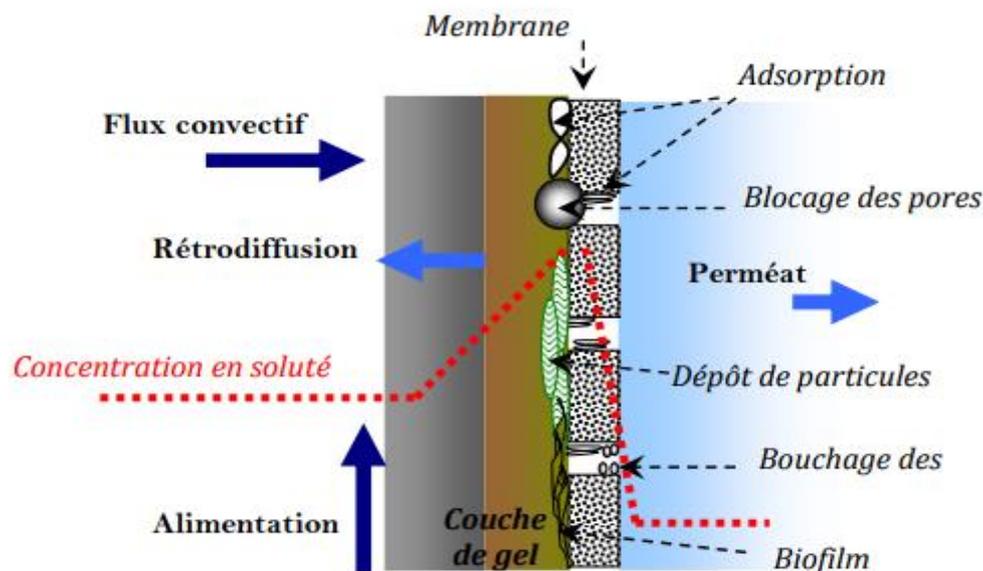


Figure I. 9 : Schéma des différents mécanismes de colmatage [30]

- Si la taille des particules est supérieure à celle des pores un colmatage en surface dit colmatage par gâteau se produit (dépôt en surface de la membrane).
- Si la taille des particules est largement inférieure à celle des pores, les particules vont entrer à l'intérieur de la membrane réduisant progressivement la taille des pores jusqu'à les boucher totalement. C'est ce qu'Hermia appelle le bouchage de pore. Il s'en suit une réduction de la surface poreuse de la membrane.
- Si la taille des particules est similaire à celle des pores un phénomène de blocage de pore se produit. Ce phénomène de blocage conduit à une diminution de la surface filtrante de la membrane.

I-10- Conclusion

La station d'épuration des eaux usées comporte plusieurs étapes et différents procédés. L'étape primaire est constituée par les prétraitements et la décantation qui permet d'éliminer de l'eau les matières en suspension (déchets grossiers, sables...) et les huiles. L'étape secondaire qui associe l'épuration biologique et le décanteur secondaire, élimine les matières en solution dans l'eau (matières organiques, substances minérales...). En fin, Il existe plusieurs technologies de traitement des eaux pétrolières. Le BRM est une technologie révolutionnaire, il se caractérise par des performances intéressantes en matière d'élimination de polluants biodégradables ainsi que les micropolluants considérés comme étant difficilement dégradables dans les systèmes conventionnels de traitement des eaux usées. Les eaux traitées par le BRM ont une excellente qualité en matière de MES et de désinfection. Les deux défis majeurs de la technologie BRM restent dans l'encrassement des membranes et les consommations énergétiques élevées. Dans le chapitre suivant nous nous lançons le défi d'épurer une eau polluée en hydrocarbures à travers un bioréacteur à boucle externe.

Chapitre II

Matériels et Méthodes

II-1- Introduction

L'objectif principal de ce travail est le traitement biologique combiné au BRM d'une eau polluée synthétiquement par l'hydrocarbure, ainsi la présentation des caractéristiques de l'effluent synthétique, suivi par une description de l'unité expérimentale (BRM à boucle externe) utilisée. Et afin de contrôler l'efficacité d'élimination de la pollution, des prélèvements des échantillons ont été effectués en deux points de traitement, à l'entrée et à la sortie du bioréacteur à membrane.

Parmi les paramètres physico-chimiques étudiés sont : La température ($^{\circ}$ C), le pH, la conductivité électrique (μ s/cm), la turbidité (NTU*), les MES (mg/L), les MVS (mg/L), la demande chimique en oxygène (DCO), l'indice de mohlman, l'indice des boues (IB),

II-2- préparation des boues

Les boues utilisées dans cette étude sont prélevées de la station d'épuration des eaux usées urbaines de Réghaia. Avant l'utilisation, la boue doit être lavée et filtrée.

II-2-1- Lavage des boues

Les boues activées sont une matrice complexe dans laquelle différents interférents sont présentes. Pour s'affranchir de ces derniers lors des dosages, un protocole expérimental a été mis en place. Les boues prélevées de la station d'épuration sont préalablement lavées à l'eau de robinet trois à quatre fois, puis filtrées sur le filtre Buchner avant d'être à nouveau lavées et filtrées, de manière à éliminer toute source de nutriments et de carbone autre que celles fournies par la suite par l'expérimentateur.

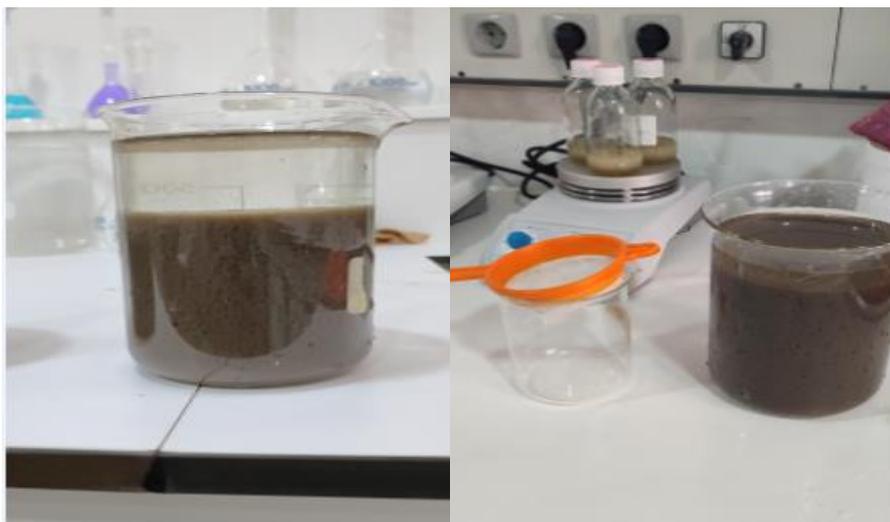


Figure II. 1 : Lavage des boues activées



Figure II. 2 : Filtration des boues activées

II-2-2- Réactivation des boues

Après le lavage, les boues sont destinées à une réactivation avant l'utilisation, donc la nutrition est nécessaire pour cette opération. La quantité de matière sèche est déterminée afin de connaître la concentration initiale des boues dans le réacteur. Pour cela, 5 ml de boues sont prélevés et mis à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant. A partir de cette concentration, le volume de boues à introduire dans le flacon pour avoir une concentration de 1 g/L peut être déterminé.

A-Matériel et réactifs

Tableau II. 1 : matériel et réactifs

| Matériels | Réactifs |
|-------------------------------|---|
| Bécher de 2L | KH_2PO_4 |
| Fiole de 500 mL | K_2HPO_4 |
| Trois fioles de 100 mL | $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |

Balance

NH₄Cl

Agitateur magnétique

CaCl₂

Verre fritté ou pompe aquarium (pour l'aération)

MgSO₄.7H₂O

FeCl₃.6H₂O

CH₃COONa

Eau distillée

B-Mode opératoire :

Partie I : préparation des solutions minérales

Les solutions minérales ont été préparées selon la norme 301 A du test de Sturm [31]

Solution A

- Dihydrogénophosphate de potassium, KH₄PO₄ 4,25g
- Hydrogénophosphate de dipotassium, K₂HPO₄ 10,40g
- Hydrogénophosphate disodique dihydraté, Na₂HPO₄.2H₂O 16,70g
- Chlorure d'ammonium, NH₄Cl 0,25g

Dissoudre dans 500 mL d'eau.

Solution B

- Chlorure de calcium anhydre, CaCl₂ 2,75g

Dissoudre dans 100 mL d'eau.

Solution C

- Sulphate de magnésium heptahydraté, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 2,25g
Dissoudre dans 100 mL d'eau.

Solution D

- Chlorure de fer (3) hexahydraté, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 0,025g
Dissoudre dans 100 mL d'eau.

Partie II : Nutrition des boues

Pour la nutrition des boues **Figure (II.3)**, nous avons suivi les étapes ci-dessous :

- Après lavage des boues, prendre 1L de liqueur mixte (mélange eau-boues activés) dans un bécher de 2L ;
- Mettre en œuvre le système d'agitation et d'aération ;
- Ajouter 10 mL de solution A, 1 mL de solution B, C et D et 3g d'acétate de sodium CH_3COONa (substrat organique) et 3g de NH_4Cl , quotidiennement.



Figure II. 3 : Réactivation des boues au niveau du laboratoire

Remarque : La manipulation s'étend sous agitation et sous aération, sans arrêt, pendant environ 30 jours avant l'usage expérimental.

Partie III: Evolution des boues

Pour pouvoir suivre l'évolution des boues pendant la période de réactivation on peut déterminer les MES et les MVS, quotidiennement, par la filtration sous vide. Pour cela nous avons suivi le mode opératoire suivant :

- Peser le papier filtre vide pour avoir sa masse M_0 ;
- Mettre le papier filtre vide de M_0 dans l'appareil de filtration sous vide ;
- Verser 10 mL d'échantillon et laisser le jusqu'à ce qu'il soit complètement filtré ;
- Mettre le papier filtre qui contient l'échantillon après filtration dans l'étuve à 105°C jusqu'au poids constant (2h environ) ;
- Une fois sorti de l'étuve, peser le poids de papier filtre pour avoir sa masse M_1 ;
- Pour les MVS, prendre 10 mL d'échantillon et le verser dans un creuset vide préalablement pesé ;
- Placer le creuset dans un four à 550°C et déterminer le poids M_2 pour calculer les MVS ;
- Tracer la courbe de variation de MES et MVS en fonction du temps.

• Expressions des résultats : [32]

$$\text{MES (mg/L)} = \frac{(M_1 - M_0)}{V} \times 1000 \quad (\text{II.1})$$

$$\text{MVS (mg/L)} = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \times 1000 \quad (\text{II.2})$$

Avec

- M_0 : masse du papier filtre vide en mg ;
- M_1 : masse du papier filtre vide et du contenu après séchage à 105 °C ;
- M_2 : masse du creuset et du contenu après séchage à 550 °C ;
- V : volume de l'échantillon en ml.

II-3- Etude la cinétique de croissance

Les boues destinées à un ensemencement sont préparées deux à trois jours avant utilisation. Laisser sous agitation et sans source de nutriments, puis filtrées une dernière fois juste avant emploi. Elles sont alors remises en suspension dans de l'eau distillée.

II-3-1- Dispositif expérimental

Le milieu de culture est composé d'oligo-éléments sous forme de solution de Trinci, d'une source de phosphate sous forme de KH_2PO_4 , NaH_2PO_4 , H_2O , une source d'azote NH_4Cl et notre source de carbone (1mL de toluène + 2mL de n-heptane).

Les traitements aérobies sur souches pures sont réalisés dans des flacons de 250 mL contenant 100 mL d'échantillon sous agitation constante de 150 tours/min et placés à l'étuve à 30°C durant toute la durée de l'expérience. Les flacons sont fermés à l'aide de bouchons en coton cardé. L'échantillon est dupliqué pour assurer la reproductibilité des résultats. Le pH est ajusté à 7.

Nous avons travaillé dans des milieux stériles, pour cela toutes les solutions ont été autoclaves et cela avant l'ajout du (n-heptane + toluène)

A-Matériels et réactif

| Matériels |
|-----------|
|-----------|

| |
|--|
| 2 flacons de 250 mL ; éprouvette de 50 mL ; éprouvette de 100 mL ; incubateur ; pH-mètre ; |
|--|

| Réactifs |
|----------|
|----------|

| |
|---|
| EDTA di Na.2H ₂ O ; NaOH ; MgSO ₄ .7H ₂ O ; CaCl ₂ .2 H ₂ O ; ZnSO ₄ .7 H ₂ O ; MnSO ₄ .1H ₂ O ; CuSO ₄ .5H ₂ O ; (NH ₄) ₂ Fe(SO ₄) ₂ .6H ₂ O ; (NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ . 6H ₂ O ; KH ₂ PO ₄ ; NaH ₂ PO ₄ ; HCl et NaOH ; (n-heptane + toluène). |
|---|

B-Mode opératoire

- Préparer le milieu de culture sous forme de solution de Trinci de composition citer dans le **Tableau (II.2)** ci-dessous ;
- Prendre 50 ml de solution d'oligo-élément ;
- Prélever 100 ml d'échantillon de boues activées ;
- Mettre le tout dans un flacon de 250 ml et juger le pH à 7 (préparer 2 à 3 flacons pour assurer reproductibilité des résultats) ;
- Placer les flacons à l'incubateur à 30 °C durant toute la durée de l'expérience.



Figure II. 4 : Dispositif expérimental des flacons

Tableau II. 2 : Composition de solution d'oligo-élément de boues [33]

| Oligo-éléments | Concentration |
|---|-------------------------|
| EDTA di Na.2H ₂ O | 15 g.L ⁻¹ |
| NaOH (10 M) | 5 mL.L ⁻¹ |
| MgSO ₄ .7 H ₂ O | 5 g.L ⁻¹ |
| CaCl ₂ .2 H ₂ O | 1,3 g.L ⁻¹ |
| ZnSO ₄ .7 H ₂ O | 0,4 g.L ⁻¹ |
| MnSO ₄ .1 H ₂ O | 0,3 g.L ⁻¹ |
| CuSO ₄ .5 H ₂ O | 0,1 g.L ⁻¹ |
| (NH ₄) ₂ Fe(SO ₄) ₂ .6 H ₂ O | 2,8 g.L ⁻¹ |
| (NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ . 6 H ₂ O | 0,073 g.L ⁻¹ |
| KH ₂ PO ₄ | 3,40 g.L ⁻¹ |
| NaH ₂ PO ₄ | 3,55 g.L ⁻¹ |

II-3-2- Analyse de la croissance bactérienne

La méthode directe (dénombrement) : le dénombrement cellulaire sur boîte de pétri (voire figure ci-dessous). Dans cette étude, nous procédons à la méthode directe « dénombrement

des bactéries après culture », pour analyser l'évolution des microorganismes présent dans les boues activées. [34]

Principe de la technique

La méthode la plus utilisée pour mesurer la croissance bactérienne est le dénombrement des bactéries après la culture. Le nombre de bactéries par millilitre représente le résultat. Cette méthode offre un avantage non négligeable : elle permet de mesurer le nombre de bactéries viables. Cependant, elle représente un seul inconvénient : il faut généralement attendre 24 heures ou plus pour que des colonies se forment et qu'elles soient visibles. Cette méthode de mesure suppose que chaque bactérie donne naissance à une seule colonie au cours du développement et de la division. Nous passons ensuite à la dilution en série de $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$, $\frac{1}{10000}$, $\frac{1}{100000}$. Ensuite, 1 ml de chaque dilution est tamponné dans l'un des procédés.

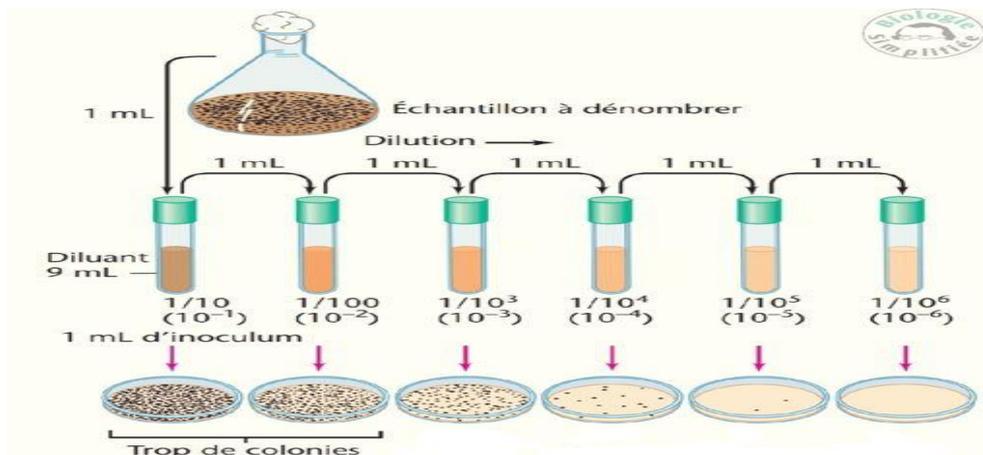


Figure II. 5 : Mesures directes : Dénombrement des bactéries après culture par l'étalement en surface

Le dénombrement de colonies après culture sur une gélose en boîte de pétri peut se faire par la technique d'étalement en surface. La **Figure (II.6)** représente le principe du technique. [34]

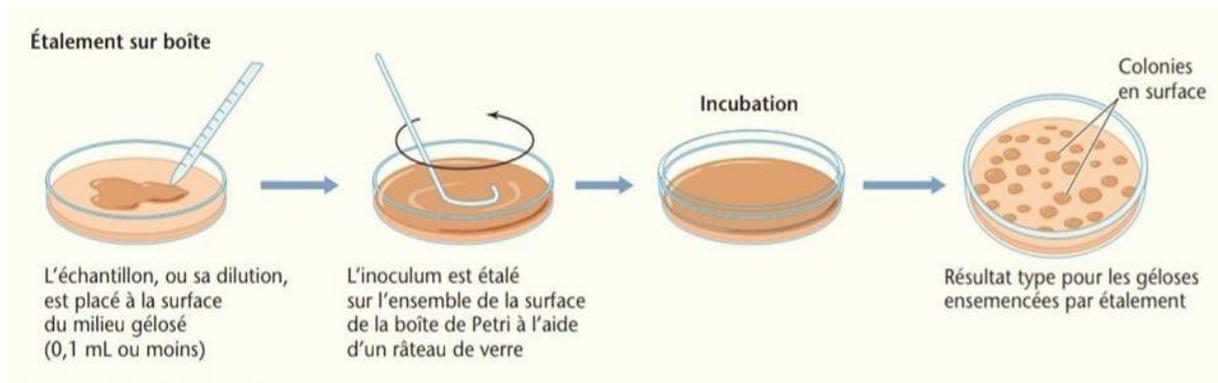


Figure II. 6 : principe de technique d'étalement en surface

A-Matériels et réactifs

| Matériels |
|---|
| 6 boîtes de pétri ; bec bunsen ; pipette pasteur ; pipette de 1 mL ; éprouvette de 10 mL ; 6 tubes d'essai. |

| Réactifs |
|----------------------------------|
| Gélose nutritif ; eau distillée. |

B. Mode opératoire

▪ Partie I : La dilution

La dilution de la technique de dénombrement des colonies après culture se fait comme suivant:

- Ajouter 9 mL de diluant (eau distillée) aux tubes d'essai ;
- La suspension microbienne à prélever doit être homogénéisée (agitation par mouvement circulaire pendant 10 secondes environ ou à l'aide d'un vortex) ;
- Ouvrir et flamber l'ouverture du tube ;
- Utiliser une pipette stérile pour Prélever 1 ml de suspension (ne pas introduire la pipette dans la suspension de plus de 1 cm) ;
- Flamber et refermer le tube ;
- Ouvrir le tube de 9 ml de diluant et flamber l'ouverture pour introduire le volume prélevé (éviter tout contact entre la pipette contenant l'inoculum et le diluant stérile) ;
- Flamber et refermer le tube ;
- Jeter la pipette souillée dans le bac à eau de javel.

La dilution suivante s'effectue comme la dilution décrite ci-dessus mais en partant du tube de la dilution précédente



Figure II. 7 : Représente la technique de la dilution

▪ **Partie II : Etalement en boîtes de pétri**

Dans cette partie, nous avons choisi la méthode d'étalement en surface des boîtes de pétri, pour laquelle nous allons procéder aux étapes suivantes :

- Placer la gélose nutritif (GN) dans un bain marin à une température 80°C pendant 2 heures ;
- Inoculer la GN dans des boîtes de pétri et laisser reposer pendant environ 2 heures pour qu'elle se solidifie ;
- Verser 0.1 mL d'un échantillon sur la surface de GN avec une micropipette, puis étaler uniformément l'inoculum avec une tige en verre stérilisée de forme spécifique voire la **Figure (II.9)** ci-dessous ;
- Fermer et retourner les boites, puis incuber dans un incubateur, à 30°C pendant 24 h ;
- Calculer le nombre de colonies qui se sont formées sur la surface. La lecture se fait après chaque 24h, à l'aide d'un compteur colonies présenté dans la **Figure (II.8)** ci-dessous ;
- Tracer la courbe de variation de nombre de bactéries N en fonction de temps.



Figure II. 8 : Compteur de colonies

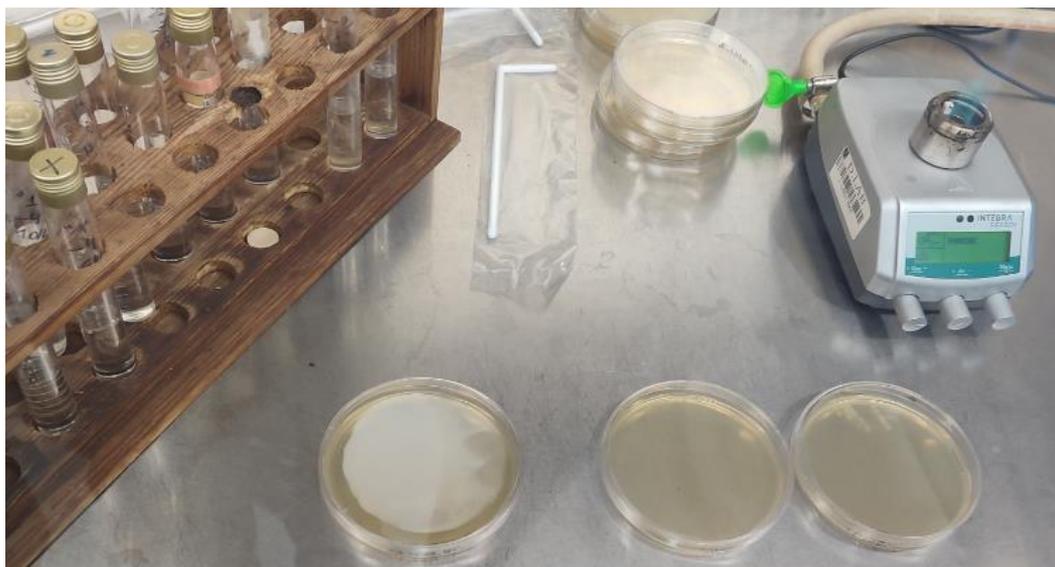


Figure II. 9 : Etalement en boîtes de pétri

➤ **Expression des résultats : [34]**

$$N(\text{nombre de bactéries /ml}) = \frac{\text{nombre de colonies} \times \text{volume}}{\text{la concentration de l'échantillon}} \quad (\text{II.3})$$

II-4- Présentation du pilote (BRM)

L'ensemble de l'étude est réalisé en utilisant un bioréacteur à boucles externe, son schéma est représenté sur la **Figure (II.10)**.

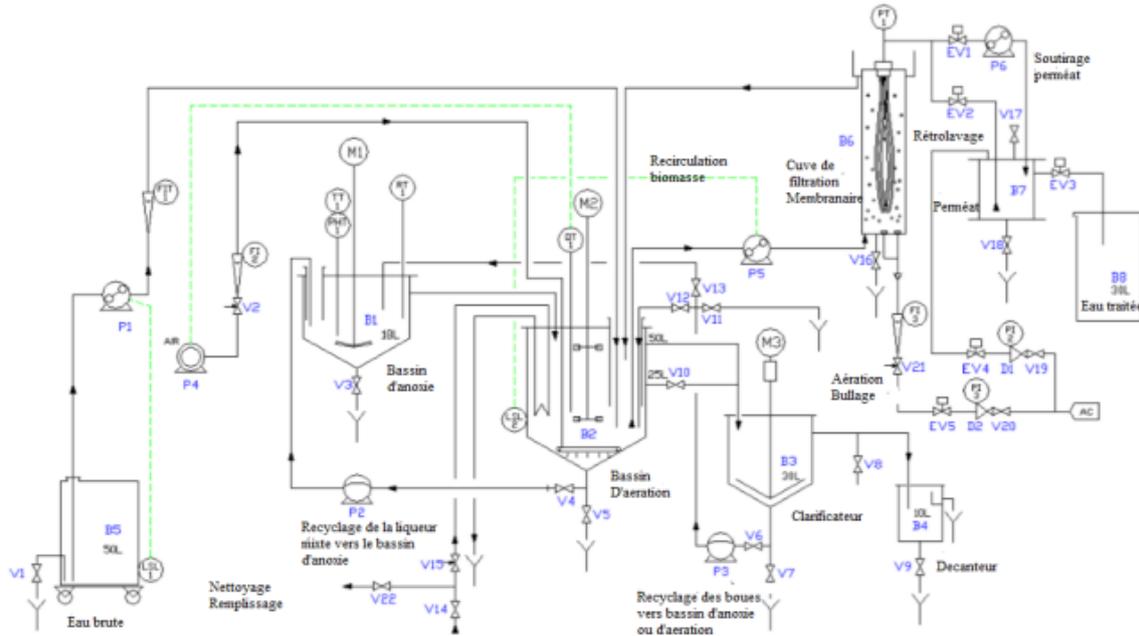


Figure II. 10 : Schéma du Bioréacteur à Membrane (Boucle externe) [20]

L'ensemble des composants de l'unité bioréacteur à membrane est soutenu par deux châssis sur roullants. Elle se compose de deux parties différentes, d'une première partie de traitement par boue activée et d'une seconde partie de filtration membranaire externe [20].

- La première partie fonctionne comme suit **Figure (II.11)** :
 - L'effluent synthétique que nous allons utiliser (20 L de volume) dans notre étude est préparé et stocké dans une cuve de 50L.
 - Le bassin d'aération est alimenté par une pompe péristaltique. Lorsque le réservoir d'alimentation est vide, un détecteur de niveau bas arrête la pompe.
 - Un système d'agitation avec 2 turbines Rushton à vitesse variable, un diffuseur d'air et d'une sonde d'oxygène dissous sont installés dans le bassin d'aération.
 - Le diffuseur d'air est connecté à un compresseur piloté en fonction des niveaux d'O₂ dissous dans le bassin d'aération.
 - Les débordements permettent la surverse du bassin d'aération dans un décanteur également appelé clarificateur équipé d'un agitateur à vitesse lente fixe.
 - Le recyclage des boues qui décantent vers le bassin d'aération est effectué par une pompe pilotée en continue ou selon un minuteur.
- La seconde partie du fonctionnement comme suit **Figure (II.12)** :

- La cuve de filtration est alimentée en continu (ou par phase) à l'aide d'une pompe péristaltique, à partir du bassin d'aération. La cuve de filtration contient le module membranaire.
- Un flux d'air est injecté autour du module membranaire afin de conserver un certain taux d'oxygène dans la solution et pour effectuer un brassage mécanique de la membrane et limiter les dépôts sur le filtre.
- Une pompe de suction P6 effectue la filtration à travers le module membranaire.
- Pour effectuer un rétro-lavage, un certain volume de perméat est renvoyé en sens inverse dans la membrane, le perméat est temporairement stocké dans un réservoir intermédiaire qui peut être mise sous pression pendant le cycle de fonctionnement.
 - Un jeu d'électrovanne permet de travailler en cycle sur l'unité :
 - Filtration
 - Repos
 - Rétro-lavage
 - Temps total de travail journalier : 18 h.
 - Cycle de travail : 10 min.
 - Temps de relaxation : 2 min ou plus



Figure II. 11 : Traitement par boues activées [20]

Partie filtration membranaire externe



Figure II. 12 : partie filtration membranaire externe [20]

B1 : Bassin d'anoxie.

B5 : Bassin d'eau brute.

B2 : Bassin d'aération.

B6 : Cuve de filtration.

B3 : Le premier clarificateur.

B7 : Bassin de perméat.

B4 : Le deuxième clarificateur.
péristaltiques.

P1, P2 ...P6 : Des pompes

V1, V2...V22 : Vannes.

EV1, EV2...EV5 : Electrovanes.

D2 : Manomètre.

M1, M2, M3 : Agitateurs mécaniques.

II-5- Module membranaire

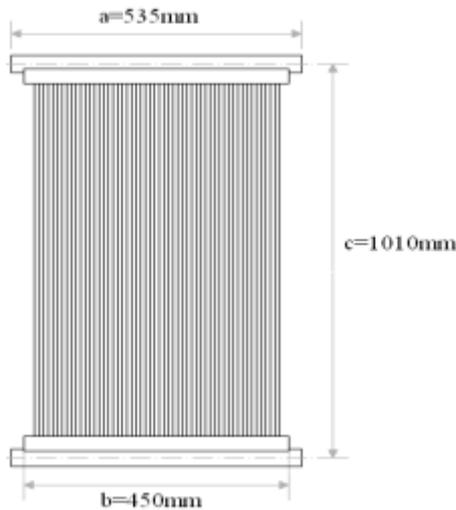
La membrane utilisée a été fabriqué par ORELIS Environnement, est une membrane de microfiltration à fibre creuse immergée du type rideau, organique (polyfluorure de vinylidène, PVDF) [20].

II-5-1- Caractéristiques du module fibre creuse de type rideau

Les caractéristiques du module sont représentées dans le **tableau (II. 3)**

Tableau II. 3 : Caractéristiques du module fibre creuse de type rideau [20]

| Type de module | Dimensions a×b×c en mm | Surface membranaire m ² | Débit m ³ /j.module |
|----------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| HFI35010M1 | 535 x 450 x 1010 | 10 | 2,4 – 4, |



- **a** : est la longueur du collecteur
- **b** : est la longueur de la tête du module
- **c** : est la hauteur du module

Figure II. 13 : Module de fibre creuse de type rideau [20]

II-5-2- Caractéristiques de la membrane de microfiltration

Les caractéristiques de la membrane de microfiltration (**Tableau II .4**) et les conditions de nettoyage de la membrane (**Tableau II.5**) sont données ci-dessous.

Tableau II. 4 : Caractéristiques de la membrane de microfiltration [20]

| Caractéristiques | Type membrane | Fibre creuse |
|---------------------|--|----------------|
| Membrane | Matériau | PVDF |
| | Taille des pores | 0 ,1 µm |
| | Diamètre de la fibre (intérieur /extérieur) | 0,8 mm/ 1,5 mm |
| | Structure de pore de la membrane | Asymétrique |
| Performances | Rétention MES >2µm | 100 % |

| | | |
|---------------------------------|---|--|
| Conditions d'utilisation | Rétention des Micro-organismes | 99,999 % |
| | Turbidité perméat | ≤ 1 NTU |
| | Indice de colmatage (SDI) | ≤ 2,5 |
| | Sens de filtration | Extérieur – intérieur |
| | Dépression | 0,1 à 0,5 bars (pression négative) |
| | Température de travail | 5 – 45 °C |
| | pH d'utilisation | 2-11 (lavage pH 1-12) |
| | Débit de perméat | 10-20 L/h.m ² (selon qualité eau brute) |
| | Ratio aération / débit recommandé | 20/1 à 40/1 |
| | Exigence alimentation en air | Air comprimé exemple d'huile |
| | Teneur en hydrocarbures maximal dans l'eau brute | <3 mg /L |
| | Concentration maximale de chlore résiduel dans l'eau brute | 200 mg/L |
| | Concentration maximale de chlore résiduel dans l'agent de nettoyage | 5000 L |

II-5-3- Conditions de nettoyage

Les conditions de nettoyage de la membrane (**Tableau II.5**).

Tableau II. 5 : Conditions de nettoyage de la membrane [20]

| Condition du Rétro lavage | Fréquence rétro lavage | Une fois tous les 1 à 7 jour (déterminer l'eau brute) |
|---------------------------|-------------------------------------|---|
| | Durée du rétro lavage | 10 minutes |
| | Taux de perméations en rétro lavage | 20 - 40 L/h.m ² |
| | Pression maximum durant le | 0,5 bar |

| | | |
|---|---|---|
| Nettoyage chimique de l'unité | rétro lavage | |
| | Fréquence | 1 à 3 mois (à déterminer lors des essais) |
| | Temps de lavage | 120 minutes |
| Nettoyage chimique en profondeur | Produits chimiques | Solution de NaClO ≤ 1000 mg/L de chlore |
| | Fréquence | 3 à 6 mois (Selon les résultats des essais) |
| | Temps de lavage | 2 à 6 h |
| | Produits chimique | Lavage Acide : solution 0,3 à 1% de HCl Lavage Basique : solution 0,2 à 0,5 % de NaOH NaClO : solution de 0,5 à 1% en volume de NaClO |
| | Température de la solution de nettoyage | 10 à 40 °C (l'efficacité de nettoyage sera améliorée avec la température) |

II-6- Traitement de l'eau polluée par le BRM

II-6-1- Echantillonnage des eaux

Les échantillons d'eau sont recueillis dans des flacons en verre bien lavés doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension). Dans notre cas, nous avons effectué le prélèvement de l'échantillon d'eau dans le bioréacteur et dans le décanteur, durant le temps de notre expérience, ces prélèvements sont destinés aux analyse physico-chimique (pH, température, turbidité, MES, MVS, DCO, etc.) quotidiennement.

II-6-2- Mis en œuvre le BRM

L'équipement est un Bioréacteur à membrane pour l'épuration des eaux usées représenté dans la **Figure (II.14)** ci-dessous, équipé avec des appareils de mesures de quelques paramètres physico-chimique de l'eau.

A. Matériels et réactifs

| Matériels : |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Pilote bioréacteur à membrane |

| Réactifs : |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Polluant (toluène, n-heptane) ; eau de robinet ; les solutions A, B, C, D ; NH₄Cl. |

B. Mode opératoire

▪ Partie I : Préparation de polluant (toluène, n-heptane)

Dans cette étude, nous avons préparé 100 ml de solution du polluant (toluène 30 ml et n-heptane 70 ml) de concentration 3,67 g/L comme suite :

- 1) Mesurer la quantité nécessaire du polluant pour préparer l'eau à traiter ;
- 2) Mettre le polluant mesurer dans 20L d'eau de robinet ;
- 3) Mettre la solution dans le bac de stockage pour le traité.

▪ Partie II : Dépollution de l'eau par le BRM

Pour épurer l'eau de robinet qui contient le polluant, on réalise les étapes suivantes :

- 1) Mettre dans le bioréacteur à membrane un volume de 2,5 L de boues activées mélanger avec 20L d'eau de robinet qui contient le polluant, (les boues sont réactivées au niveau du laboratoire pendant environ 30 jours) ;
- 2) Mise en marche le système d'agitation et d'aération, puis, laisser la liqueur mixte dans le bioréacteur (environ 2h) avant les premiers prélèvements. Après, prendre les échantillons nécessaires pour analyser les paramètres de fonctionnement du bioréacteur ;
- 3) Transmettre une quantité de mélange vers le clarificateur jusqu'à le remplissage, après, laisser pour décanter environ 2h et prendre les échantillons pour analyser les paramètres physico-chimiques de l'eau épuré ;
- 4) Au final, recycler les boues décantées vers le bioréacteur avec un débit QR = 5,084 ml /S :



Figure II. 14 : Pilote expérimental à boues activées BRM

II-6-3- Méthodologies : Analyses et modes opératoires

II-6-3-1- Analyse physico-chimique

Différentes méthodes d'analyses ont permis de déterminer les divers paramètres physico-chimiques :

a. La température

La température est déterminée au même temps que le potentiel d'hydrogène par le pH mètre qui contient une sonde de température, le pH mètre utilisé est représenté dans la **Figure II.15** ci-dessous.

b. Le potentiel d'hydrogéné pH

La mesure du pH a été effectuée sur site à l'aide d'un pH-mètre muni d'une électrode préalablement étalonnée avec des solutions tampon pH (4 et 7). La méthode consiste à plonger l'électrode dans l'échantillon contenu dans un bêcher, Après la stabilisation de l'affichage sur le cadran du pH mètre, on lit la valeur du pH directement. [35]

➤ Mode opératoire

Tout d'abord on rince le bêcher et l'électrode avec de l'eau distillée, puis avec de l'eau à analyser, ensuite on remplit le bêcher avec l'échantillon et on immerge l'électrode avec une faible agitation, Nous lisons directement le pH lorsque sa valeur est stabilisée. L'appareil est donné par la figure suivante.

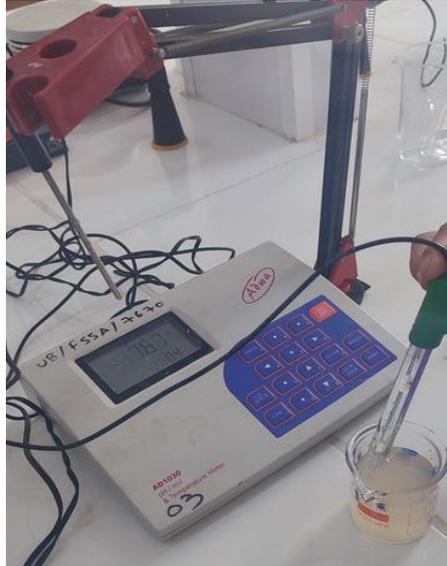


Figure II. 15 : pH mètre de marque Adwa AD 1030 mesurer la température et le pH

c. La conductivité :

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes de platine de 1 cm² de surface, séparé par une distance de 1 cm. [35]

➤ **Mode opératoire**

Premièrement on rince plusieurs fois la cellule de la conductivité avec de l'eau distillée, puis on plonge l'électrode complètement dans un récipient contenant l'eau à analyser. Par la suite on agite l'échantillon afin que la concentration ionique entre les électrodes soit identique à celle du liquide, cette agitation permet d'éliminer les bulles d'air sur les électrodes. Enfin on note la valeur finale affichée sur le conductimètre. Le résultat est donné directement en $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Figure II. 16 : Conductimètre de marque Cond 1970i

d. La turbidité :

La turbidité mesure la propriété optique de l'eau qui résulte de l'absorption de la lumière par les particules en suspension présentes dans l'eau. [36]

➤ **Mode opératoire**

On met l'appareil sous tension et après rinçage plusieurs fois de la cuvette par l'échantillon à analyser, on remplit par la suite la cuvette par ce dernier et on place la prise d'essai de l'échantillon et on appuie " READ " le résultat s'affiche en NTU, et l'appareil utilisé est celui présenté au-dessous.



Figure II. 17 : Turbidimètre de marque Lovibond TB 300 IR

e. Demande chimique en oxygène (DCO)

Il s'agit d'une méthode de détermination de la demande chimique en oxygène par digestion, à 150 °C en réacteur, et lecture colorimétrique. Le test de la DCO consiste en la mesure de l'oxygène équivalent à la quantité de matières organiques oxydables par le dichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$, dans une solution d'acide sulfurique à 50 %. Un composé à base d'argent est ajouté comme catalyseur. Un composé mercurique est ajouté pour réduire les interférences dues à l'oxydation des ions chlorures par le dichromate de potassium. [35]

f. Les matières en suspension (MES)

Pour la détermination des matières en suspension (MES) on utilise la méthode par filtration sur papier filtrant de 1.2µm de porosité. Le filtre est séché à 105°C puis pesé après refroidissement. Le dispositif de filtration est constitué d'une base supporte-filtre surmonté d'un entonnoir amovible entre lesquels a été pincé le filtre. Un volume représentatif de l'eau

(entre 10 et 20 ml) de chaque échantillon ont été filtré à travers un filtre. Préalablement conditionné et pesé. [36]

g. Les matières sèches (MS) et les matières volatiles sèches (MVS)

La détermination des matières sèches et des matières volatiles est réalisée, respectivement, la méthode consiste à déposer un volume connu de boues sur le creuset puis on met dans l'étuve à 105 °C. On calcul la matière sèche après pesée. Le taux des MVS est obtenu après calcination de l'échantillon précédent à 550°C. [36]

II-6-3-2- Les paramètres de fonctionnement d'un bioréacteur

a. Indice de mohlman IM – Indice de boue IB

• **L'indice de mohlman**

Il représente le volume occupé par un litre de boues non diluées après 30 minutes de décantation divisée par la concentration de matières en suspension (MES) des boues. Il est défini par la formule suivante :

$$\text{IM(ml/g)} = \frac{V_{30}}{[\text{MES}]} \quad (\text{II.4})$$

V_{30} lu : volume de boues décantées en 30 minutes, exprimé en ml/L. Le V_{30} lu doit être compris entre 100 et 300 ml.

Si V_{30} lu est supérieure à 300 mL/L : une dilution supplémentaire doit être effectuer

[MES] : Concentration de MES dans la boue. [32]

• **L'indice de boue**

$$\text{IB(ml/g)} = \frac{V_{30} \text{ lu} \times \text{facteur de dilution}}{[\text{MES}]} \quad (\text{II.5})$$

Chapitre III

Résultats et discussions

III-1- Introduction

Ce chapitre synthétise les résultats de l'étude expérimentale du traitement d'eaux usées synthétiquement contaminées par des hydrocarbures dans un BRM, par boue activée. En premier lieu, nous avons effectué une réactivation des boues d'environ 30 jours, au même temps, on a réalisé l'étude de la croissance bactérienne. Au cours de ce procédé d'épuration par le BRM qui a été réalisé sur une période de 12 jours du 04 au 15 Mai, la boue réactivée qui contient l'eau polluée passe par un bassin aéré puis par un décanteur, ensuite traverse une membrane en fibre creuse de microfiltration. Nous allons suivre le comportement de la biomasse pendant le traitement biologique, faire des analyses physico-chimiques et étudier l'efficacité de la membrane en fonction des conditions opératoires choisies. Les performances de la variation de la pression transmembranaire sont également étudiées, afin d'évaluer son effet sur la qualité du rejet final.

III-2- Caractérisation de la boue

Les boues activées ont été extraits du bassin d'aération de la station d'épuration de Alger (Réghaia). Elles ont subi diverses analyses pour leur caractérisation. Les résultats obtenus sont représentés sur le **tableau III.1** ci-dessous.

Tableau III. 1: Caractéristiques de la boue activée.

| Paramètres | Résultats |
|---|-----------|
| pH | 6,36 |
| Température (°C) | 25,44 |
| Oxygène dissous (mg O ₂ /L) | 3,55 |
| Matière sèche (%) | 2,01 |
| DCO (mg O ₂ /L) | 6951 |
| DBO ₅ (mg O ₂ /L) | 2003 |
| MVS /MS (%) | 34,12 |
| Indice de boue (mL/g) | 68,71 |

Chapitre III : Résultats et discussions

D'après le **tableau (III.1)**, nous constatons que la boue activée présente un DCO de 6951 mg d'O₂/L, DBO₅ de 2003 mg d'O₂/L et un indice de boue de 68.71ml/g cette valeur est le reflet de la décantabilité des boues. En général un IB (indice du volume des boues) entre 50 et 150 ml/g est le signe d'une boue de bonne qualité. En revanche la valeur mentionner dans le tableau III.1 est supérieur à 50 ce qui indique la bonne décantation des boues. Ceci peut être expliqué par le fait que les floccs sont suffisamment concentrés.

III-3- Réactivation des boues

La réactivation est suivie par la mesure de la matière en suspension MES et la matière volatile MVS durant la période de la réactivation environ (25 jours), les résultats obtenus sont présentés sur la **figure (III.1)** et la **figure (III.2)**.

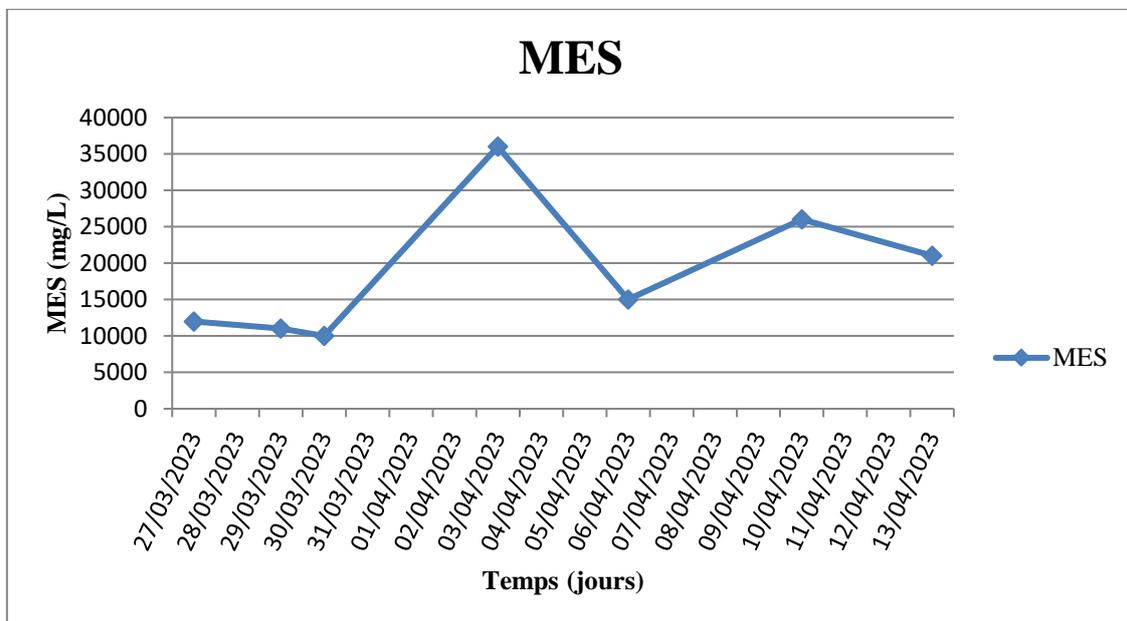


Figure III. 1: Variation de MES pendant la réactivation de la boue.

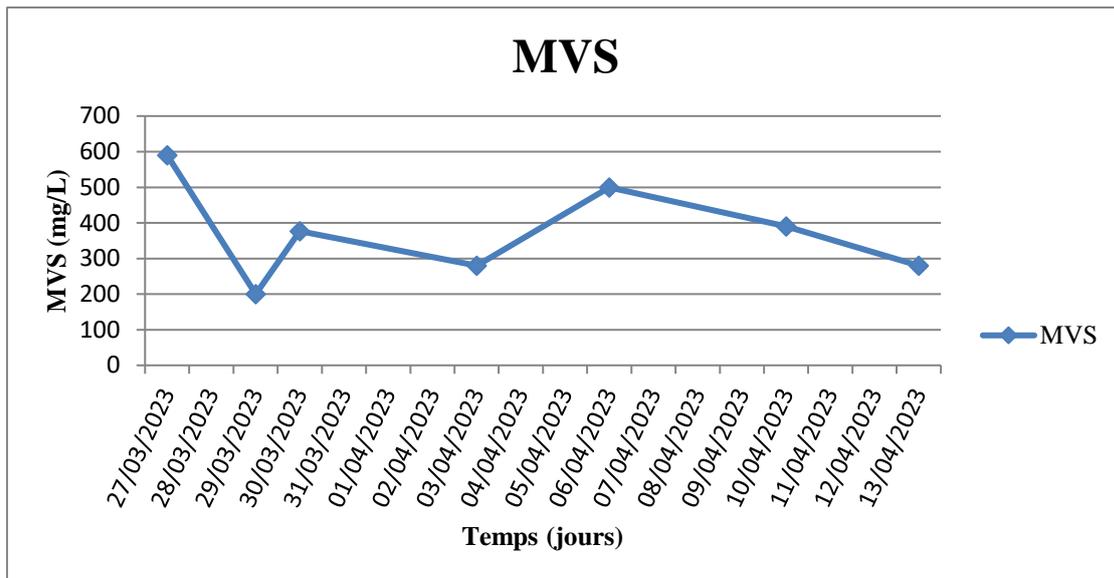


Figure III. 2: variation de MVS pendant la réactivation de la boue.

D'après les résultats présentés sur les deux **figures (III.1) et (III.2)**. On note que lors de la réactivation, les MES et les MVS subissent des changements allant de 10000 mg/L au minimum pour les MES et 280 mg /L pour les MVS, au maximum pour les MES 36000 mg/L et 590 mg/L pour les MVS et une limite moyenne pour les MES 15000 mg/L et 377mg/L les MVS, et cela peut s'expliquer par un manque de nutriments et une moindre prolifération de bactéries. Au-delà de ces valeurs de MES et MVS, nous observons une augmentation des valeurs de MES et MVS et ceci est lié à la croissance et le développement des microorganismes et ces résultats prouvent que la boue est prête pour la décomposition des matières organiques.

III-4- Etude de la croissance bactérienne

Les bactéries sont parmi les formes de vie les plus abondantes sur Terre, et elles sont essentielles à la vie quotidienne dans chaque écosystème. La croissance bactérienne se définit comme l'augmentation ordonnée de tous les composants d'une bactérie et elle est caractérisée par une augmentation du nombre de bactéries. La fission binaire est le processus par lequel les bactéries se multiplient. Une cellule mature se divise en deux cellules filles, séparées par un septum de division formée par la paroi cellulaire. L'ADN et les autres composants se dupliquent pendant la division. La formation du septum et la séparation résultent de la réorganisation des parois par divers systèmes enzymatiques de synthèse et de dégradation.

Pour étudier ce phénomène, les bactéries ou les boues activées sont cultivées en culture pendant 18 jours dans des conditions contrôlées. Le nombre de cellules dans un milieu peut être évalué

Chapitre III : Résultats et discussions

en comptant directement le nombre de cellules. Le **tableau (III.2)** présente les résultats obtenus concernant la cinétique de croissance bactérienne des échantillons de boues réactivées.

Tableau III. 2: Représente les résultats de la cinétique de croissance bactérienne.

| Temps (jours) | Nombres des colonies | Nombres des bactéries |
|---------------|----------------------|-----------------------|
| 06/04/2023 | 177 | 1770 |
| 10/04/2023 | 128 | 128000000 |
| 13/04/2023 | 136 | 1360000 |
| 17/04/2023 | 294 | 29400 |
| 20/04/2023 | 35 | 350000 |
| 24/04/2023 | 91 | 91000 |

La représentation graphique de la croissance bactérienne, connue sous le nom de courbe de croissance bactérienne, offre un aperçu de la dynamique des populations microbiennes. Elle permet d'appréhender et de surveiller l'évolution de ces populations au fil du temps. La croissance des populations ou des cultures bactériennes est composée de plusieurs phases, chacune présentant une vitesse de croissance spécifique distincte.

La **figure (III.3)** illustre la courbe de croissance bactérienne obtenu :

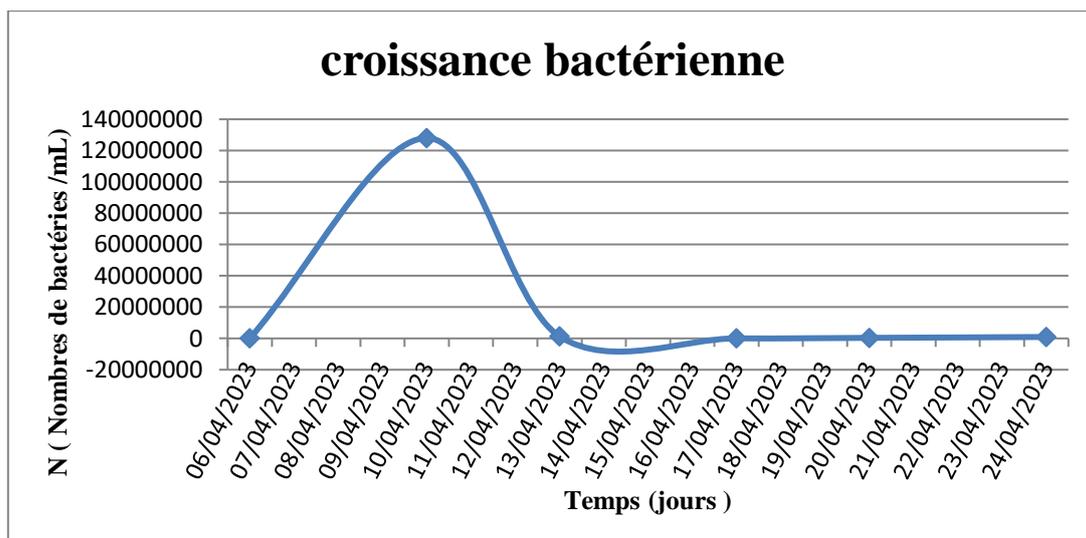


Figure III. 3: Courbe de développement d'une culture bactérienne.

Chapitre III : Résultats et discussions

La croissance d'une bactérie s'étudie en milieu liquide. Il existe 4 phases dont l'ensemble constitue la courbe de croissance.

- Phase de latence

La durée de cette phase, qui s'étend sur 4 jours, correspond à la période qui sépare l'inoculation initiale du moment où la croissance devient perceptible. Cette croissance peut être lente ou absente en raison de l'adaptation physiologique des cellules aux conditions de culture ou d'une dilution des exo-enzymes dus à la faible densité initiale. La durée d'adaptation dépend également du type de microorganismes, du nombre de germes inoculés, ainsi que des différences de compositions et de concentrations entre le milieu de culture précédent et le nouveau milieu

- Phase exponentielle ou de croissance

Une fois la phase de latence terminée, les cellules amorcent leur division. Elles entrent alors dans une période de croissance appelées phase de croissance exponentielle, qui dure 3 jours. Durant cette période, la reproduction cellulaire atteint son intensité maximale et le temps de génération est réduit au minimum. Le taux de croissance, c'est-à-dire la vitesse spécifique de croissance, est à son apogée.

- Phase maximale stationnaire

Le taux ou la vitesse de croissance diminue ou est nul. La phase exponentielle ne dure que quelques jours, et le milieu devient de moins en moins propice à la croissance. Le nombre de cellules viables reste constant, ce qui peut correspondre à un équilibre entre la multiplication cellulaire et la disparition des cellules par autolyse. Plusieurs facteurs peuvent jouer un rôle dans un milieu de culture, tels que l'épuisement des nutriments, l'accumulation de déchets et des variations défavorables du pH.

- Phase de déclin ou de décroissance

Pendant cette période, les bactéries cessent de se diviser et entrent dans une phase de maturation où elles sont lysées par leurs propres enzymes. En d'autres termes, les microorganismes ne sont que peu ou plus du tout alimentés, ce qui entraîne la disparition d'une partie d'entre eux par respiration endogène. Ils survivent grâce à leurs réserves, mais finissent par mourir, laissant derrière eux des déchets organiques non biodégradables. Pendant cette période, le taux de mortalité peut rester constant, tout comme le taux de croissance.

III-5- Analyse des paramètres physico-chimique

Les mesures réalisées ont été sélectionnées en tenant compte de leur adéquation avec les mesures courantes sur le terrain, de la quantité d'informations fournies et des équipements disponibles. En examinant l'évolution du traitement de notre polluant (toluène et n-heptane) par boue activée au fil du temps, nous avons pu tirer des interprétations à partir de certains paramètres physico-chimiques, que nous présenterons maintenant de la manière suivante :

III-5-1- Variation de la température

La température joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels...etc. D'autant plus, L'action des microorganismes du système de boues activée est essentiellement influencée par la température. Pour cela nous avons suivi pendant le traitement biologique sa variation, qui est illustré dans la **figure (III.4)**

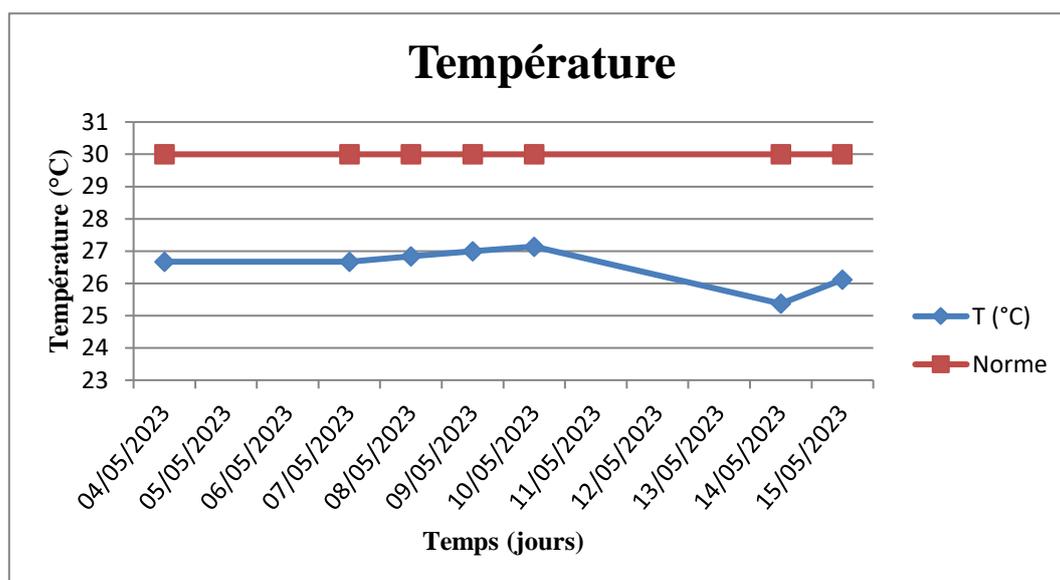


Figure III. 4: La variation de température.

Nous constatons que la température est de 26,67°C au 1^{er} jour du lancement de processus, elle augmente légèrement après une semaine de traitement, jusqu'à atteindre son maximum de 27,14°C au 7^{eme} jour, pour descendre à une température minimale de 25,37°C au 11^{eme} jour, cette chute est relative au climat ou à la température ambiante de la salle, mais pas au point de déstabiliser l'activité bactérienne. On note que la boue activée contient des bactéries mésophiles qui préfèrent une température moyenne comprise entre 20 et 40 °C.

Chapitre III : Résultats et discussions

Bien qu'il y ait eu une légère variation de la température des différents échantillons prélevés, les valeurs observées restent inférieures à la norme qui est de 30°C, et qui est en accord avec les exigences du traitement biologique.

III-5-2- Variation de pH

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H_3O^+ (noté H^+ pour simplifier). De manière à faciliter cette expression ; on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ [39] :

$$pH = \log 1/ [H^+]$$

Le pH est un paramètre variable qui peut assurer un environnement propice à l'activité d'une boue activée, en le gardant au voisinage de la neutralité pour la survie des microorganismes. Au cours de notre expérience, nous avons suivi ce paramètre afin de surveiller le bon développement de la biomasse, les résultats sont présentés sur la **figure III.5** :

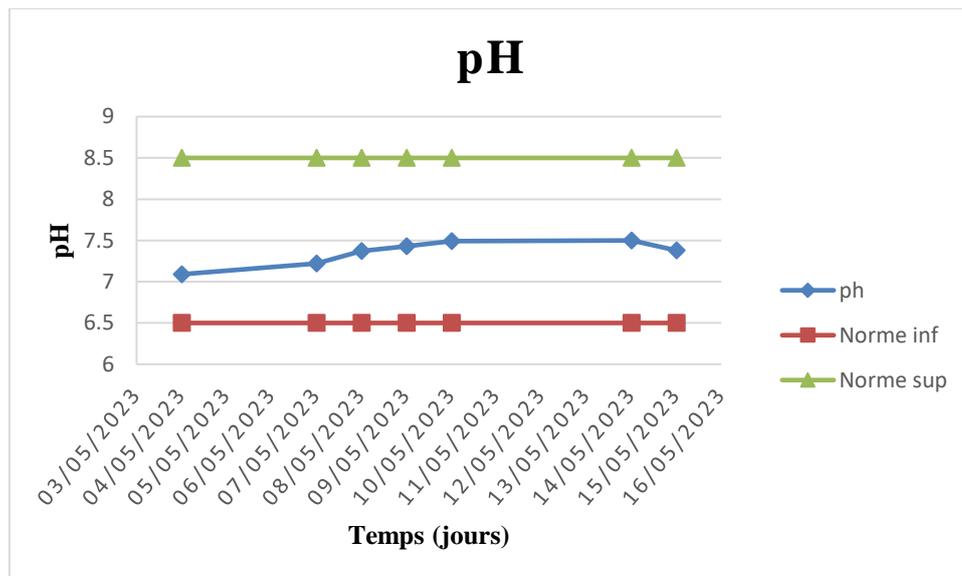


Figure III. 5: Variations des valeurs de pH.

L'analyse de l'évolution du pH durant la période d'étude montre que les valeurs se varient de 7,09 (au premier jour du lancement de notre traitement) à 7,5 (au dixième jour), on remarque qu'il n'a pas une grande augmentation de pH des différents échantillons prélevés, ce qui signifie que notre milieu est favorable et les valeurs sont satisfaisants tout le long du processus biologique. Par conséquent, nous pouvons dire que les résultats obtenus sont conformes à la norme de l'OMS. Qui est entre 6,5 et 8,5.

III-5-3- Variation de la conductivité électrique CE

La CE désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. La conductivité est un facteur qui influence la croissance des bactéries La conductivité est exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$ [41]. Les résultats obtenus sont représentés sur la **figure (III.6)**.

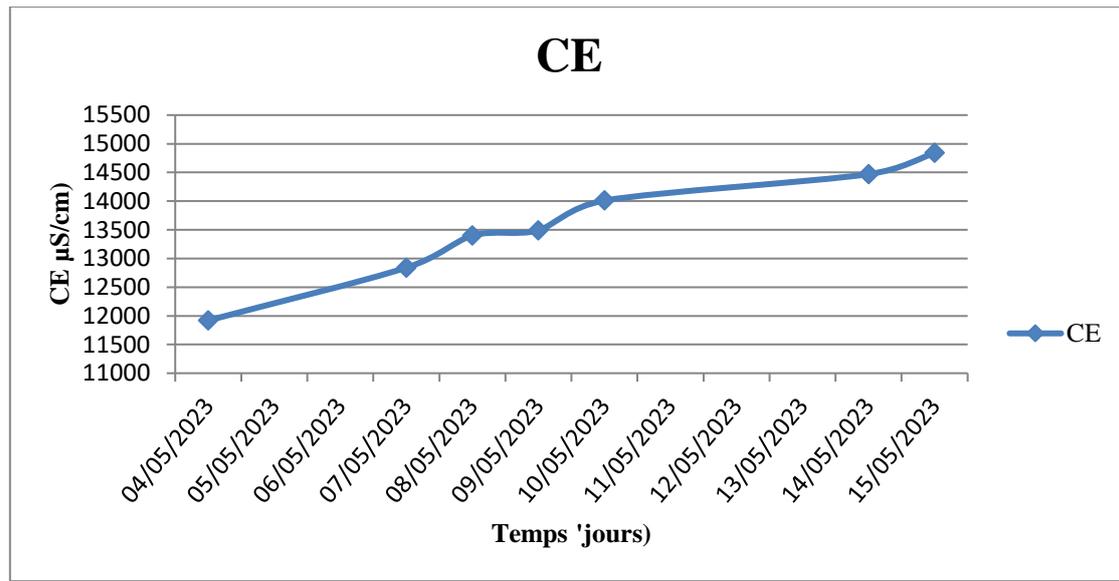


Figure III. 6: Variation des valeurs de conductivité.

En se référant à la **figure (III.6)**, l'analyse des résultats de la conductivité électrique pour les échantillons prélevés au cours de notre traitement par boue activée révèle une augmentation de la conductivité électrique. Cette augmentation suggère que l'eau à traiter est fortement chargée en ions, et il est probable que ces ions proviennent de la composition de la solution nutritive utilisée, plus la biomasse augmente plus la conductivité augmente, la biomasse se multiplie.

III-5-4- Variation de la turbidité

La turbidité est inversement proportionnelle à la transparence de l'eau, elle est de loin le paramètre de pollution indiquant la présence de la matière organique ou minérale sous forme colloïdale en suspension dans les eaux usées. Elle diffère en fonction des matières en suspension (MES) présentes dans l'eau [38]. Les résultats obtenus sont donnés sur la **figure (III.7)**.

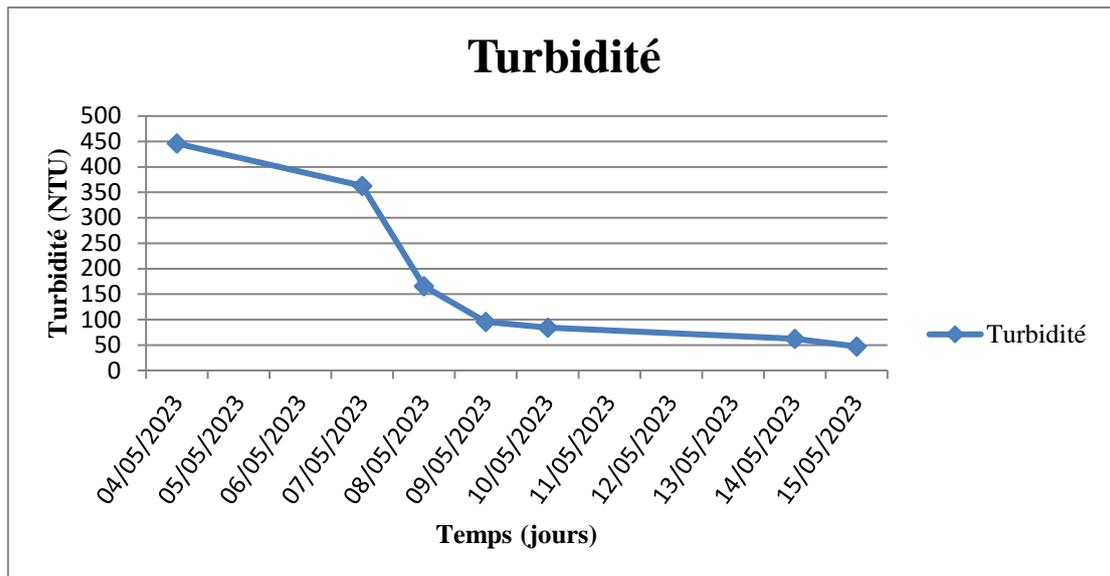


Figure III. 7: Variation de la turbidité.

Les résultats obtenus révèlent une diminution significative de la turbidité au fil du temps, passant de 446 NTU à 47,1 NTU. Cette diminution est attribuable à la dégradation des matières organiques présentes dans l'eau traité. Donc, on constate qu'on a un bon traitement puisque on a un taux d'abattement de turbidité qui atteinte 89,43 %.

III-5-5- Variation de la matière en suspension (MES)

Exprimée en mg par litre. Ce sont les matières non dissoutes de diamètre supérieur à 1 μ m contenues dans l'eau. Dans le milieu récepteur, les MES peuvent entraîner des perturbations de l'écosystème par une diminution de la clarté de l'eau, de plus, ces MES peuvent être de nature organique et entraîner les nuisances associées aux molécules organiques [38]. La figure (III.8) montre la variation de la concentration des matières en suspension (MES).

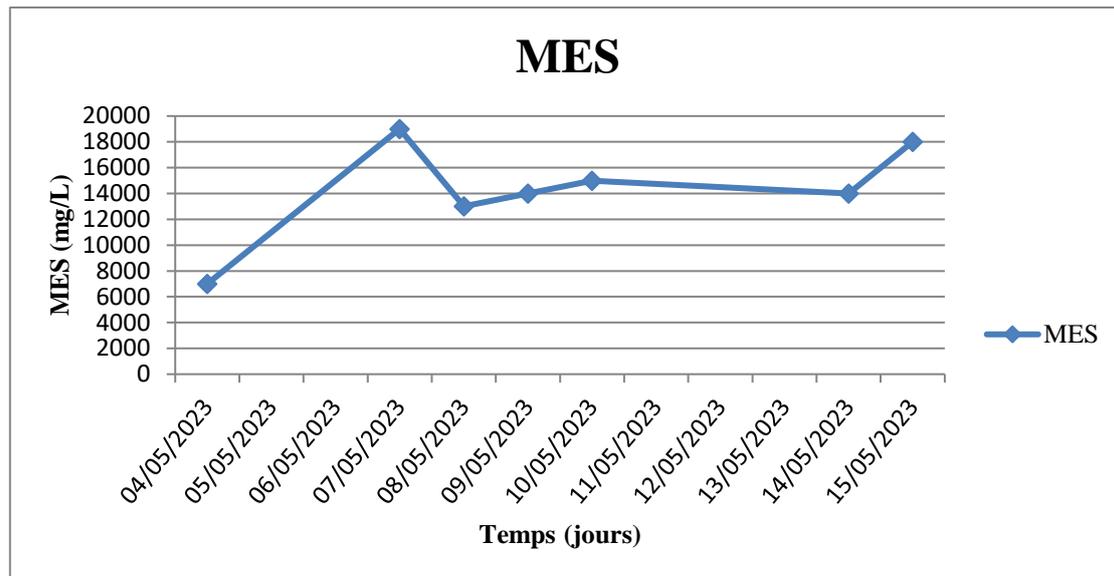


Figure III. 8: Variation de la concentration de MES.

Selon la représentation ci-dessus, la quantité MES augmente de 7000 à 19000 mg/L au cours des quatre premiers jours. Durant cette étape, la microflore épuratrice se multiplie et consomme la pollution organique ce qui explique l'augmentation des MES, après en remarque une diminution de la concentration à une valeur de 13000 mg/L et cela peut être le résultat d'un manque de nutriments, après, elle augmente imperceptiblement avant d'atteindre une valeur de 18000 mg/L.

III-5-6- Variation de matière volatile en suspension (MVS)

Elles sont recueillies soit par filtration, soit par centrifugation, séchées à 105°C, puis pesées, ce qui fournit la teneur en MES (mg/L). Elles sont ensuite chauffées à 500-600°C, les matières volatiles disparaissent, et la perte de poids est attribuée aux MVS (g ou mg/L) [38]. La **figure (III.9)** montre la variation de la concentration de boues dans le bassin d'aération durant la période des expériences.

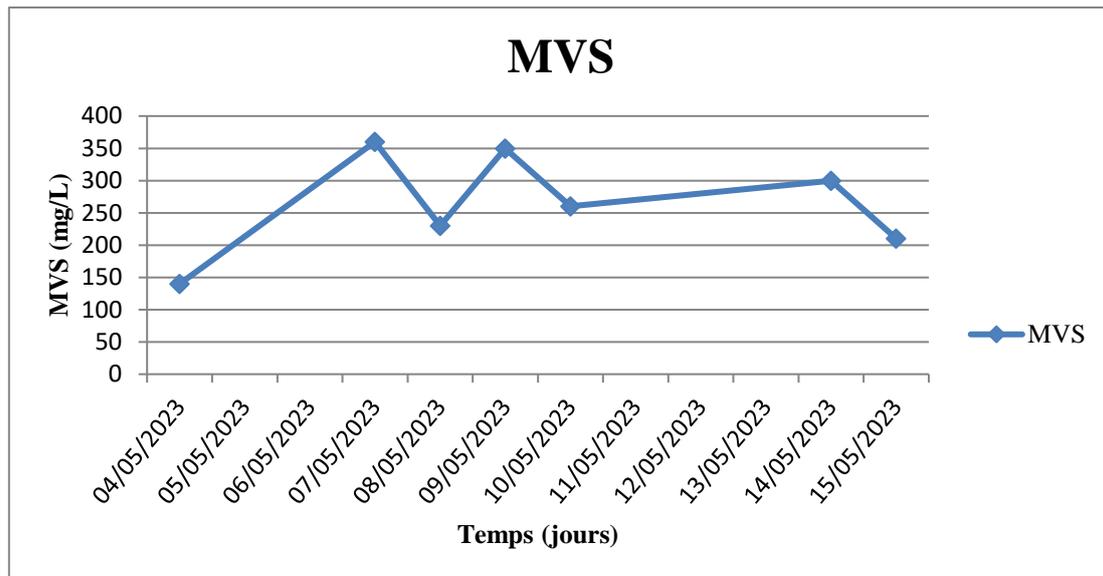


Figure III. 9: Variation de la concentration des boues (exprimée en MVS) dans le bassin d'aération et décanteur.

La **figure (III.9)** illustre les variations des concentrations des Matières volatiles en Suspension (MVS) enregistrées pendant la période de prélèvement, allant d'une valeur minimale de 140 mg/l à une valeur maximale de 360 mg/L pour nos échantillons prélevés. Cette variation est attribuable au taux de recirculation de la boue. Et ces valeurs peuvent être attribuées à une bonne décantation dans le décanteur.

III-5-7- Variation de la demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la mesure de la quantité d'oxygène requise pour oxyder la matière organique et inorganique oxydable contenue dans un échantillon. Ce paramètre donne une estimation de la quantité de polluants présents dans un effluent industriel ou une eau usée. Les eaux d'un effluent industriel dont la DCO est élevée peuvent provoquer des problèmes de diminution de la concentration d'oxygène [40]. Les résultats obtenus sont donnés sur la **figure (III.10)**.

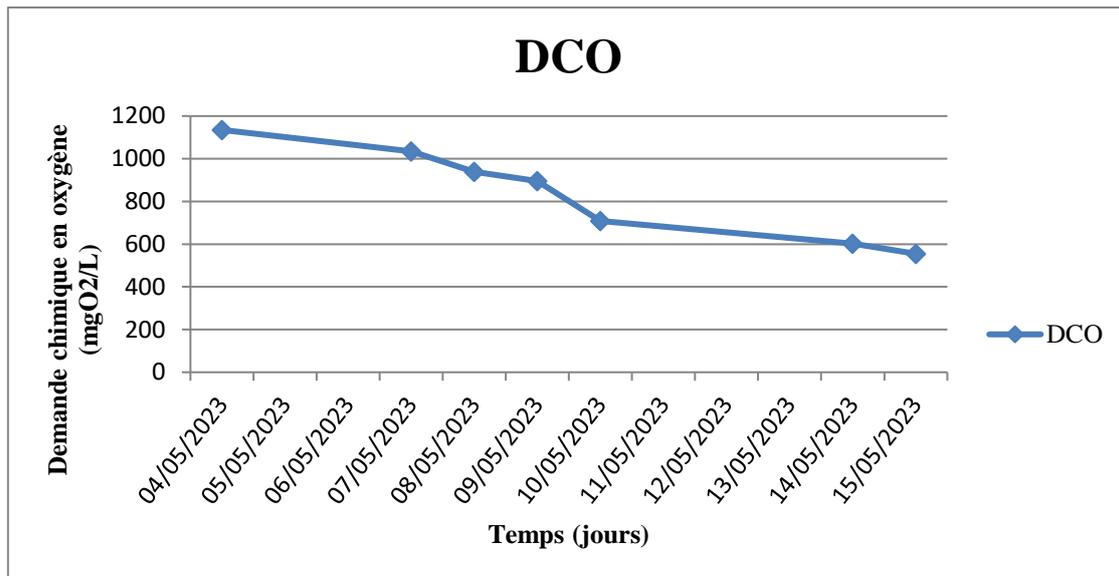


Figure III. 10: Variation de la demande chimique en oxygène (DCO).

En se référant aux valeurs illustrées dans le **tableau (I.1)** concernant les normes algériennes de rejet des eaux usées qui se trouve dans le **chapitre I**, il est recommandé d'avoir une concentration de DCO de 130 mg d'O₂/L dans l'eau traitée.

Les résultats de la DCO obtenus démontrent une élimination pas très convaincante à cause de manque de nutriments rajouté pendant le traitement, la valeur de DCO au 1^{er} jour est 1135 mg d'O₂/L, et au cours du traitement, une diminution jusqu'à 555 mg d'O₂/L a été observée, ce qui correspond à une efficacité de traitement de 51,1%. Cette performance indique la qualité d'eau rejetée qui n'est pas très satisfaisante mais elle a atteint les 50%. Cette efficacité démontre le pouvoir épuratoire important des microorganismes qui nécessitent de l'O₂ pour répondre à leurs besoins métaboliques, notamment la dégradation de la pollution organique.

III-5-8- Variation de la demande chimique en oxygène la DBO5

Pratiquement, la demande biochimique en oxygène devrait permettre d'apprécier la charge du milieu considéré en substances putrescibles, son pouvoir auto-épurateur et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration. La demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO5) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques [40].

Le **tableau III.3** donne la variation de la concentration de la DBO₅ durant la période de traitement.

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III. 3: Variation de la DBO₅.

| Temps (jours) | DBO ₅ (mg d'O ₂ /L) |
|---------------|---|
| Eau brute | 110,5 |
| 04/05/2023 | 96,8 |
| 09/05/2023 | 75,44 |

Nous constatons que les valeurs de la DBO₅ varient entre 110 à 75 mg/L avec un rendement de 32,27%, nous pouvons déduire donc que la valeur de 75 mg/L reste supérieur à la norme, ceci peut être expliqué par la mauvaise aération dans le bassin biologique ou bien une augmentation de la quantité d'oxygène dissous pendant le traitement.

III-6- Les paramètres de fonctionnement d'un bioréacteur

III-6-1- Evolution de L'indice de Mohlman et l'indice de Boue

Le contrôle de la qualité de la boue activée dans les bassins d'aération ainsi que de la capacité de décantation dans le clarificateur est assuré grâce à l'utilisation de l'indice de Mohlman. Cet indice est exprimé en mL/g et est calculé à partir des valeurs de V₃₀ et des MES du bassin, selon les relations (II.5 et II.4) concernant le calcul de l'IM et de l'IB mentionné dans le chapitre II. Les valeurs calculées de l'indice de Mohlman (IM) et de l'indice de boue (IB) sont regroupées dans le tableau (III.4).

Tableau III. 4: Valeur de l'indice de Mohlman et l'indice de boue.

| Temps (jours) | V ₃₀ (mL/L) | I _B (mL/g) | I _M (mL/g) |
|---------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 04/05/2023 | 130 | 223,36 | 93,52 |
| 15/05/2023 | 50 | 114,67 | 56,81 |

Les valeurs de (IB) oscillent entre 223,36 et 114,67 mL/g (tableau III.4). Pour une boue qui décante bien, l'indice de Mohlman doit être inférieur à 150 ml.g-1. Le décanteur d'un pilote d'épuration fonctionne correctement pour des valeurs d'indice de Mohlman inférieures à 150 ml.g-1. Les résultats des tests de décantation en éprouvette (indice de boue), montrent que les valeurs de 93,52 et 56,81 sont inférieure à 150 ml/g indiquent que la décantation est bonne.

III-7- Traitement Membranaire

En plus de leur rôle dans le processus biologique, les membranes sont essentielles pour la séparation solide/liquide. Cette séparation est cruciale pour éliminer de nombreuses espèces polluantes présentes dans l'eau. Dans cette deuxième partie du chapitre, notre objectif est d'évaluer les performances d'une membrane de microfiltration et d'étudier l'impact de la pression transmembranaire sur la qualité de l'eau traitée. À la fin de cette étude, nous chercherons à déterminer la valeur optimale de ce paramètre opérationnel pour obtenir un rejet de meilleure qualité.

III-7-1- Effet de la variation de la pression transmembranaire

La force motrice permettant le transfert à travers une membrane est la différence de pression entre l'alimentation et le perméat de la membrane, également connue sous le nom de pression transmembranaire (PTM). Nous avons choisi des valeurs PTM de 1, 2 et 3 bars en fonction de la plage tolérée par la membrane de microfiltration, qui est généralement comprise entre 0,1 et 3 bars. Les résultats de l'analyse de l'impact de ce paramètre sur les performances sont présentés ci-dessous :

III-7-1-1- Effet de la PTM sur la demande chimique en oxygène (DCO)

Lorsqu'elles se dégradent, les matières organiques consomment l'oxygène dissous dans l'eau. En cas de surabondance, elles peuvent entraîner une consommation excessive d'oxygène, ce qui peut provoquer une pollution qualifiée parfois de toxique. Afin de comprendre le rôle de la membrane dans la qualité du perméat, il est essentiel d'évaluer ses performances en termes de Demande Chimique en Oxygène (DCO). Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de la variation de la PTM sur ce paramètre. Le **tableau III.5** ci-dessous représente les valeurs de la DCO dans le perméat après chaque pression fixée :

Tableau III. 5: Influence des différentes PTM sur la dégradation de la DCO.

| Pression (bar) | Avant filtration | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------|------------------|-------|-----|-------|
| DCO (mg O ₂ /L) | 758,5 | 458,5 | 318 | 263,5 |

Chapitre III : Résultats et discussions

| | | | | |
|------------------------------|---|-------|-------|-------|
| Taux d'abattement (%) | - | 39,55 | 58,07 | 65,26 |
|------------------------------|---|-------|-------|-------|

Les résultats obtenus démontrent que l'élimination de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) augmente avec l'augmentation de la pression. À une pression élevée de 3 bars, nous avons observé une diminution significative de la concentration de DCO, atteignant 263,5 mgO₂/L avec un taux d'élimination de 65,26 %. Les performances de la membrane en termes d'élimination de la DCO sont clairement mises en évidence, car la rétention de la matière organique par la membrane est assez efficace. De plus, nous avons constaté que l'augmentation de la pression a un effet bénéfique, car plus la pression transmembranaire (PTM) est élevée, plus la concentration en DCO diminue.

III-7-1-2- Effet de la PTM sur l'élimination des TPH

Les résultats obtenus lors du traitement membranaire dans l'élimination des hydrocarbures sont représentés dans le **tableau III-6** :

Tableau III. 6: Effet de la PTM sur la rétention des hydrocarbures.

| Pression (bar) | [C] initiale de polluant | [C] en fin de traitement avant filtration | 1 | 2 | 3 |
|------------------------------|-----------------------------------|--|----------|----------|----------|
| TPH (g/L) | 3,69 | 1,6 | 1 | 0,87 | 0,7 |
| Taux d'abattement (%) | | 56,64 | 37,5 | 45,63 | 56,25 |

Avant la filtration, la valeur des Hydrocarbures Pétroliers Totaux (TPH) était de 1,6 mg/L, et les résultats présentés dans le **tableau III.6** démontrent une efficacité d'élimination de 56,25% obtenue lors du traitement membranaire. Et une efficacité d'élimination de 81,02 % de la concentration initial de notre polluant. Cela nous conduit à conclure que la membrane a contribué à une amélioration globale de 34,13 % des performances d'élimination des TPH au cours du traitement. Cependant, la valeur des TPH reste constante avec l'augmentation de la pression transmembranaire (PTM). L'effet de la membrane sur l'élimination des hydrocarbures

Chapitre III : Résultats et discussions

peut être expliqué par deux raisons principales : Tout d'abord, les hydrocarbures étaient dispersés dans la solution mixte sous forme de petites gouttelettes d'huile, et elles ont probablement été retenues à l'intérieur du bioréacteur car leur taille était supérieure à la porosité de la membrane. Deuxièmement, les hydrocarbures ont tendance à adhérer à la surface de la membrane en raison des interactions hydrophobes avec les fibres membranaires polymériques (PVDF), ce qui entraîne une diminution des hydrocarbures dans le rejet.

III-8- Conclusion

Cette présente étude avait pour objectif la synthèse, la caractérisation et l'application de performances de filtration des eaux usées industriel. Après avoir effectué un traitement biologique par pour activée. Nous avons divisé notre chapitre en deux parties :

Première partie est d'évaluer les performance et l'intérêt d'un traitement biologique par la boue activées. Analyser les résultats des valeurs des paramètres physico-chimique tel que le pH ; température, turbidité, conductivité électrique et les concentrations des DCO et DBO₅ et MES et MVS, dont on a remarqué que certains paramètres ont des résultats plutôt satisfaisants n'ayant pas dépassé les limites de rejet selon les critères du journal officiel de la république algérienne tel que le pH, température...etc., et d'autres paramètres n'ont pas atteints les valeurs des limites requise à cause de plusieurs interférences qui peut être expliqué par une mauvaise aération dans le bassin d'aération de BRM ou bien un manque de nutriments ou une augmentation de l'oxygène dissous....etc.

La deuxième partie, identifier le rôle de la membrane ainsi que ses performances et sa contribution à augmenter le rendement de l'élimination de la pollution selon les différents PTM fixées.

Conclusion Générale

La problématique concernant la présence et les risques potentiels liés aux micropolluants dans l'environnement est devenue une préoccupation d'actualité. Aujourd'hui, les stations d'épuration ne sont pas en mesure de traiter de manière adéquate ce nouveau type de pollution. Par conséquent, il est nécessaire d'envisager un traitement plus efficace afin d'éliminer ces composés en amont des stations d'épuration.

Le traitement des eaux usées industrielle par le bioréacteur à membrane est une méthode prometteuse et efficace pour éliminer les polluants et rendre les eaux usées propres à être rejetées dans l'environnement ou réutilisées dans l'agriculture ou dans des domaines qui nécessitent pas l'utilisation des eaux purs.

Cette étude avait, donc, pour ambition l'étude de la dégradation d'un échantillon d'eau qui contient des hydrocarbures par le procédé biologique à boues activées. Le suivi de l'analyse des paramètres physico-chimiques de pollution à savoir : le pH de l'eau, la température, la conductivité, (MES), (MVS), DCO...etc., nous a permis d'évaluer les performances du bioréacteur utilisé ainsi que l'efficacité de la membrane associée concernant la dépollution de l'eau et la préservation de l'environnement. Les résultats suivants ont été tirés :

- L'observation de la croissance bactérienne révèle que les micro-organismes utilisent les hydrocarbures (toluène et n-heptane) comme une source essentielle à leur développement.
- La bonne nutrition des boues pendant la réactivation permis l'augmentation de son efficacité dans la dégradation de la matière organique.
- La bonne utilisation du BRM démontre que la dégradation de la pollution est possible avec des taux d'élimination considérables.
- La membrane à fibres creuses nous a montré un effet remarquable sur la qualité de rejet par l'augmentation de la pression transmembranaire.

L'analyser les résultats des valeurs des paramètres physico-chimique tel que le pH ; température, turbidité, conductivité électrique et les concentrations des DCO et DBO₅ et MES et MVS, dont on a remarqué que certains paramètres ont des résultats plutôt satisfaisants n'ayant pas dépassé les limites de rejet selon les critères du journal officiel de la république algérienne tel que le pH, température...etc., et d'autres paramètres n'ont pas atteints les valeurs des limites requise à cause de plusieurs interférences qui peut être expliqué par une mauvaise

Conclusion Générale

aération dans le bassin d'aération de BRM ou bien un manque de nutriments ou une augmentation de l'oxygène dissous....etc.

Le bioréacteur à membrane a donné un taux d'abattement de la DCO de 65,26%, pour les hydrocarbures l'élimination est quasi-totale avec un taux de rétention de 56,25%, ceci à une PTM de 3bars, ces résultats sont cependant inefficaces mais dépasser 50%.

Pour conclure, ce mémoire a apporté des connaissances utiles à l'application du BRM dans le traitement des eaux contaminées par les hydrocarbures.

Références bibliographiques

- [1] : BOUCHEMAL F ,2021 : La Réutilisation Des Eaux Usées En Agriculture à Partir De La Station D'épuration (STEP 03) De La Wilaya d'El-Oued. Mémoire de master, option : Hydraulique. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-oued.
- [2] : COLOMBANO, S., et al. (2008). Journée Technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sols pollués. Les Diagnostiques - Objectifs, enjeux & moyens. IN Gouvernement de France, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.
- [3] : CAMILLE.D, « Surveillance sanitaire et microbiologiques des eaux », Lavoisier, 2010.
- [4] : ZINEDDINE AZRO ,2017. Thèse station d'épuration de tiaret 2017
- [5] : Mr METAHRI Mohammed Saïd, 2012 : Elimination simultanée de la pollution Azotée et Phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP est de la ville de Tizi-Ouzou. Mémoire de Doctorat, option : Génie des procédés. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [6]: NEFF J.M, (n.d.). Polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment, source, fate and biological effect. Applied Science. Essex, England, 26.
- [7] : TISSOT B. P, et al D. H. (1984). Petroleum formation and occurrence. Springer, Berlin.
- [8] : SOLTANI M. (2004). Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de doctorat de l'université Paris 6, spécialité chimie analytique.
- [9] : KAVITHA, V .et al . (2004). The role of ferrous ion in Fenton and photo- Fenton processes for the degradation of phenol. (Vol. 55). Chemosphere.
- [10] : ABDELWAHAB,O.,et al.(2009). Electrochemicalremoval of phenol from oil refinery wastewater (Vol. 163). J. Hazard. Mater
- [11]: ATTIOGBE, F.K., GLOVER-AMENGOR, M., NYADZIEHE, K.T. (2007). Correlating biochemical and chemical oxygen demand of effluent sa case study of selected industries in Kumasi, Ghana. W. Afr. J. Appl. Ecol.

Références bibliographiques

- [12] : Journal Officiel De La République Algérienne, (2006). Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427, définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. (N° 26 du 23.04.2006).
- [13] : BAKIRI.Z, « Analyse et optimisation des eaux usées urbaines par boues activées : application au décanteur secondaire », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif -1, 2014.
- [14] : Joseph et al. (2002). Station d'épuration : Disposition constructives pour améliorer leur Fonctionnement et faciliter leur exploitions.
- [15] : Aussel, H., Le bàcl, C., Dornier, G., (2004). Le traitement des eaux usées, institut national de recherche et de la sécurité (INRS), point des connaissances, édition 5026, pp1-3.
- [16] : Badai-Gondard, F., (2003). L'assainissement des eaux usées, édition Technicité, France, 227p.
- [17] : Satin, M., Selmi, B., (2006). Guide technique de l'assainissement, 3 ème édition le moniteur référence technique, Paris, 726p.
- [18] : OUANOUKI, B. (2014). *Gestion de l'environnement : Traitement des eaux usées* (Vol. 02). 549, rue Mustapha Djaadi, Baraki, Alger: Copyright Eurl Pages Bleues Internationales. Récupéré sur <https://www.pagesbleues-editions.com/>
- [19] : Boumediene A, (2013) bilan de suivi des performances de fonctionnement d'unestation d'épuration a boues activées : cas de la STEP AIN EL HOUTZ). Mémoire de licence en hydraulique, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen.
- [20] : BENMIMOUNE, S ,(2021). Traitement des eaux contaminées par les hydrocarbures dans un bioréacteur à membrane, Mémoire de master, option Génie de l'Environnement, USTHB.
- [21] : DEGREMONT, S.A., (2005). Mémento technique de l'eau. Le tome, 1. Degrémont Suez,118- 1718.
- [22] : NGUYEN, D., (2014). Optimisation de la conception et du fonctionnement des stations de traitement des eaux usées, Thèse de Doctorat, Ressources Procédés Produits Environnement.

Références bibliographiques

- [23] : IACOPOZZI, I., INNOCENTI, V., MARSILI-LIBELLI, S. & GIUSTI, E., (2007). A modified Activated Sludge Model, No. 3 (ASM3) with two-step nitrification–denitrification. *Environ Model Softw*, 861, p.849.
- [24] : F. Z. Bakkal et O. Bennani, « Optimisation du fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées de Marrakech, Mémoire, université MARRAKECH. » .
- [25] : YASSINE, O., (2014). Le bioréacteur à membrane pour le traitement des eaux usées contaminées par le bisphénol a. Mémoire pour l'obtention du grade de Maître en sciences de l'eau, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec.
- [26] : YANG, W., CICEK, N., ILG, J., (2006). State-of-the-art of membrane bioreactors : Worldwide research and commercial applications in North America. *J. Membr. Sci.* 270, 201–211.
- [27] : DELGADO, F., (2009). Bioréacteur à membrane externe pour le traitement d'effluents contenant des médicaments anticancéreux: élimination et influence du cyclophosphamide et de ses principaux métabolites sur le procédé, Thèse de Doctorat, Génie des Procédés et de l'environnement, Toulouse. [28] BENALIOUCHE, H., (2018), Bioréacteur à membranes appliqué au traitement des eaux usées pour réutilisation, Thèse de Doctorat, USTHB.
- [29] : BIKAI, J., (2015). Etude de l'évolution des propriétés de surface d'un matériau minéral à porosité contrôlée lors de sa mise en œuvre dans des tests d'ultra/nanofiltration. Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace.
- [30] : OLIVEIRA, P., (2018). Des propriétés morphologiques des floccs biologiques aux conditions de fonctionnement de systèmes à boues activées, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.
- [31] : « Ligne directrice de l'OCDE pour les essais de produits chimiques », Adoptée par le conseil le 17-07-1992.
- [32] : CARDOT.C, GILLES.A, « Analyse des eaux : réglementation, analyses volumétriques et spectrophotométriques, statistiques cours et exercices corrigés », Ellipses édition Marketing S.A, 2013.

Références bibliographiques

- [33] : CHEBLI.D, « Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique », thèse de doctorat, Université FERHAT ABBAS, 2012.
- [34] : MARTIN.L, « Introduction à la microbiologie », Editions du Renouveau Pédagogique INC, 2012.
- [35] : TAGHEZOUT.F, « Impact environnemental des rejets d'eau le long du littoral occidental Algérien », Mémoire de magister, Université d'Oran, 2015.
- [36] : ALLALGUA.A, KAOUACHI.N, BOUALEG.C et al, « Caractérisation PhysicoChimique des eaux du barrage Foum El-Khanga (Région de Souk-Ahras, Algérie) », volume 13, Européen Scientific Journal, April 2017.
- [37] : FatimaZohra, Z. and H. Loubna, Traitement des eaux contaminées par les Produits pétroliers : cas du complexe DE RHOURE-NOUSS. 2016, Mémoire mastèr, Université Larbi ben m'hidi, Oum el bouaghi. p. 1,12.
- [38] : J. RODIER, B. LEGUBE, N. MERLET, et R. BRUNET, L'analyse de l'eau - 9e éd.: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, Dunod. France: Dunod, 2009.
- [39] : Gaujous, D., (1999). La pollution des milieux aquatique, aide mémoire, 2ème éditions, édition TEC & DOC, Lavoisier, Paris ,220p.
- [40] : SALGHI R ; (2000). Différentes filières de traitement des eaux. Edition ESKA, p 83-87.
- [41] : DERWICHE.E, BENAADATE.L, ZIAN.A et al, « Caractérisation physicochimiques des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec oued Fès », Larhyss Journal no 8, Juin, 2010.

Résumé :

Les eaux usées industrielles représentent une source potentielle de pollution, comprenant une variété de polluants organiques tels que les hydrocarbures, ainsi que des polluants inorganiques comme les cyanures, les sulfates, ...etc. Il est de notre responsabilité de les traiter afin de réduire leur impact polluant.

Cette étude a pour but de traiter une eau contenant des hydrocarbures à l'aide d'un bioréacteur à membrane en utilisant une boue activée. Une évaluation des performances du BRM a été conduite en analysant divers paramètres physico-chimiques de la pollution, notamment le pH, la température, la turbidité, DCO, DBO₅, MES, MVS, TPH, ...etc. Pendant le processus de traitement membranaire, l'effet de la PTM a été évalué en appliquant différentes pressions (1,2 et 3 bars) sur la capacité de filtration et la rétention de la membrane à fibres creuses.

Les résultats ont montré de bonnes performances avec l'application d'une pression de 3 bars, indiquant que plus la pression est élevée, meilleur est le rendement.

Mots clés : Traitement des eaux usées industrielles, Boue Activée, BRM, Dénombrement bactérien

Abstract:

Industrial wastewater represents a potential source of pollution, encompassing a variety of organic pollutants such as hydrocarbons, as well as inorganic pollutants like cyanides, sulfates, and so on. It is our responsibility to treat them in order to reduce their polluting impact.

The objective of this study is to treat hydrocarbon-containing water using a membrane bioreactor with activated sludge. An assessment of the MBR's performance was conducted by analyzing various physicochemical parameters of pollution, including pH, temperature, turbidity, DCO, DBO₅, MES, MVS, and others. During the membrane treatment process, the effect of PTM was evaluated by applying different pressures (1, 2, and 3 bars) on the filtration capacity and retention of the hollow fiber membrane.

The results demonstrated good performance with the application of a pressure of 3 bars, indicating that higher pressure leads to improved efficiency.

Keywords: Industrial wastewater treatment, Activated sludge, MBR, Bacterial enumeration.

ملخص:

تمثل المياه الصناعية المستخدمة مصدرا محتملا للتلوث، حيث تحتوي على مجموعة من الملوثات العضوية مثل الهيدروكربونات، بالإضافة إلى الملوثات اللاعضوية مثل السيانيدات والكبريتات وغيرها. يتوجب علينا معالجتها للحد من تأثيرها التلوثي.

تهدف هذه الدراسة إلى معالجة المياه المحتوية على الهيدروكربونات باستخدام مفاعل حيوي غشائي واستخدام الحمأة المنشطة. تم إجراء تقييم لأداء المفاعل الحيوي الغشائي من خلال تحليل مختلف المعايير الفيزيائية والكيميائية للتلوث، مثل درجة الحموضة، درجة الحرارة، العكارة، الطلب الكيميائي للأوكسجين، الطلب البيولوجي للأوكسجين، والمواد العالقة العضوية، والمواد العالقة العضوية القابلة للتبخر، إلخ. أثناء عملية معالجة الغشاء تم تقييم تأثير ضغط الغشاء من خلال تطبيق ضغوط مختلفة (1. 2 و 3 بار) على قدرة الترشيح والاحتفاظ بغشاء الألياف المجوف.

أظهرت النتائج أداء جيدا بتطبيق ضغط قدره 3 بار، مما يشير إلى أن زيادة الضغط تؤدي إلى تحسين الكفاءة.

الكلمات المفتاحية: معالجة مياه الصرف الصناعي، الوحل المنشط، المفاعل الحيوي الغشائي، عد البكتيريا.