

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES HYDROCARBURES ET ENERGIES RENOUVELABLES



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER EN GENIE CHIMIQUE**

Thème

**L'influence de la granulométrie du sable sur le
traitement (filtration) des eaux usées
industrielles**

Soutenu le : 04 juillet 2019

Présenté par

M^{elle} MAHDJOUBI Latifa

M^{me} MAHFOUDI Halima

Encadreur :

Mr. KALLOUM Slimane MCA Univ d' Adrar

Co-encadreur :

Mr. NASRI Bahous

Membres de jury

Président :

Mr.DAHOU.M MAA Univ d'Adrar

Examineur :

Mr. ARROUSSI. A MAA Univ d'Adrar

Année Universitaire : 2018 / 2019



Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Le travail présenté dans cette mémoire a été réalisé au laboratoire d'ANRH et UREER-MS ADRARE sous la direction de Mr. NASRI BAHOUS et Dr. KALLOUM SLIMAN, ma plus grande gratitude va à mon encadreur, pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée. J'ai profité pendant longtemps du savoir et du savoir-faire dont j'ai pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. J'aimerais aussi la remercier pour l'autonomie qu'il m'a accordée, et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Nous souhaitons remercier les directeurs de l'ANRH et de l'UREER-MS pour leur acceptation en tant que stagiaires au sein de leurs institutions.

Intéressant que nous avons pris tout au long de notre formation, ainsi que pour les aider.

Nous remercions également tous nos enseignants qui ont coopéré à notre formation pendant les années d'études.

Enfin, nous voudrions remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ce travail.

DÉDICACE

Donne mon meilleur fruit:

*Au symbole de la tendresse Mon père et ma mère, j'ai longtemps
attendu le moment de mon succès.*

*Au symbole de la sagesse et de la lumière grand-mères, que Dieu les
bénisse et bénisse leur âge.*

*Aux symboles d'amour et d'espoir Cher mari **MOUHAMMED**, mes
chers frères et soeurs.*

Pour coder la coopération et le respect Ma famille est gentille.

*A ma binôme **LATIFA** et toute sa famille.*

A toute mes camarades et mes camarades de 2eme master génie chimique .

A mes encadreurs et tous mes enseignants.

*Je dédie cette lettre, A tous ceux qui m'ont appris des personnages, ou qui
m'ont donné un livre, ou deux, ou qui m'ont donné du temps.*

HALIMA



Dédicace

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur
qu'on dédie du fond du coeur à ceux qu'on aime et qu'on
remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance
durant toute notre existence.*



*Je dédie ce modeste travail :
A ma très chère mère, qui n'a jamais cessé de prier pour moi,
A mon très cher père, pour ses encouragements,
A mes chers frères: soufyane, seddik, mouhammed,
A ma cher sœur : Rachida,
A mon fiancé et à sa famille,
A tous mes proches,
A mes camarades de 2^{ème} master génie chimique Années promotion
2019
A ma binôme HALIMA et toute sa famille,
A mes encadreurs et tous mes enseignants.*

LATIFA



Table des matières

Liste des abréviations et Nomenclature	I
Listes des figures	II
Listes des photos.....	II
Liste des Tableaux	III
Liste des annexes	III
Introduction générale	1
Chapitre I . Notions Générales Sur les Eaux Usées.....	3
I.1 Introduction	3
I.2 Définition des eaux usées	3
I.3 Origine des eaux usées	3
I.3.1 Les eaux usées domestiques.....	3
I.3.2 Les eaux usées industrielles	4
I.3.3 Les eaux agricoles.....	4
I.3.4 Les eaux pluviales.....	4
I.3.5 Composition des eaux usées	4
I.4 Caractéristiques des eaux usées	4
I.4.1 Paramètres Physico-chimique	5
I.4.1.1 La température	5
I.4.1.2 La turbidité.....	5
I.4.1.3 La conductivité.....	5
I.4.1.4 Le pH (potentiel hydrogène).....	5
I.4.1.5 Demande biologique en oxygène (DBO ₅)	5
I.4.1.6 Demande chimique en oxygène (DCO).....	6
I.4.1.7 Phosphore.....	6
I.4.1.8 L'Azote	6
I.5 Traitement des eaux usées	7
I.5.1 Les prétraitements	7
I.5.1.1 Le dégrillage	7
I.5.1.2 Le dessablage	8
I.5.1.3 Déshuilage.....	8
I.5.2 Traitements physico-chimiques	9
I.5.2.1 La décantation	9
I.5.2.2 Coagulation-floculation	10
I.5.3 Traitement secondaire (traitement biologique).....	11
I.5.3.1 Le lagunage naturel.....	11

I.5.3.2	Les boues activées.....	11
I.5.4	Les traitements tertiaires	11
I.5.4.1	La désinfection.....	12
I.5.4.2	La filtration	12
I.6	Conclusion.....	12
Chapitre II . Généralités Sur La Filtration Sur Sable	13	
II.1	Introduction	13
II.2	Filtration sur sable	13
II.2.1	Définition de la filtration	13
II.2.2	Principe de filtration	14
II.3	Constitution d'un filtre	14
II.3.1	La nature du milieu poreux	14
II.3.2	Types des filtres	14
II.3.3	La filtration rapide	15
II.3.3.1	Constitution d'un filtre rapide	15
II.3.3.2	Colmatage des matériaux filtrant	15
II.3.4	La filtration lente.....	16
II.3.4.1	Caractéristiques des filtres lents.....	16
II.3.4.2	Avantages des filtres lents.....	17
II.3.4.3	Inconvénients des filtres lents	17
II.3.5	Mécanisme de la filtration	18
II.3.5.1	Mécanismes physiques	18
II.3.5.2	Mécanisme biologique	18
II.4	Conclusion.....	18
Chapitre III . Matériels et Méthodes	19	
III.1	Introduction	19
III.2	Préparation du filtre du sable.....	19
III.2.1	Echantillon du sable utilisé	19
III.2.2	Analyse granulométrique du sable.....	19
III.2.3	Lavage de l'échantillon.....	20
III.3	Colonnes de filtration	21
III.3.1	Montage des colonnes.....	21
III.4	Prélèvement des eaux usées industrielle.....	21
III.5	Déroulement de l'expérience.....	22
III.5.1	Analyses des paramètres physico-chimiques de l'eau	23
III.5.1.1	Mesure du pH	23
III.5.1.2	Mesure de la conductivité	24

III.5.1.3	Détermination de la matière en suspension (MES).....	25
III.5.1.4	Détermination de la turbidité.....	26
III.5.1.5	Détermination des nitrates NO_3^-	26
III.5.1.6	Détermination des nitrites NO_2^-	28
III.5.1.7	Dosage de l'ammonium.....	30
III.5.1.8	Dosage de l'orthophosphates PO_4^{-3}	32
III.5.1.9	Demande chimique en oxygène (DCO).....	33
III.5.1.10	Demande biochimique en oxygène DBO_5	37
III.6	Conclusion.....	38
Chapitre IV . Résultats et Discussions.....		39
IV.1	Introduction.....	39
IV.1.1	Analyse granulométries.....	39
IV.1.2	Caractéristique des eaux usées industrielles.....	40
IV.1.3	Variation du potentiel Hydrogène (pH).....	40
IV.1.4	Variation de la conductivité.....	41
IV.1.5	Variation de la matière en suspension (MES).....	42
IV.1.6	La variation de la turbidité.....	43
IV.1.7	Demande chimique en oxygène (DCO).....	45
IV.1.8	La variation de la demande biochimique en oxygène (DBO_5).....	46
IV.1.9	La variation de l'ammonium NH_4^+	47
IV.1.10	La variation de nitrite NO_2^-	48
IV.1.11	La variation de nitrate NO_3^-	49
IV.1.12	La variation de l'ortho phosphate PO_4^{-3}	50
IV.1.13	Comparaison des résultats avec les études précédentes.....	51
IV.2	Conclusion.....	52
Conclusion générale.....		53
Références Bibliographiques.....		54
Annexes.....		57
ملخص.....		62
Abstract.....		63
Résumé.....		64

Liste des abréviations et Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.	
CE	Conductivité Électrique.	mS/cm
DBO ₅	Demande Biochimique en Oxygène (05 jours).	mg/l d'O ₂
DCO	Demande Chimique en Oxygène.	mg/l d'O ₂
EDTA	Éthylène Diamine Tétra-Acétique.	
MES	Matière En Suspension.	mg/l
NTU	Néphélobimétrie Turbidité Unit.	
PE	Prise d'essai.	
PH	Potentiel Hydrogène.	
PVC	Polychlorure de Vinyle.	
Q.S.P	Quantité Suffisante Pour.	
URER.MS	Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien.	
UV	Ultraviolet	Nm

Listes des figures

Figure III:1 : coupe du filtre à sable utilisé.....	21
Figure III:2 : Vérification du titre de la solution de sulfate de fer et d'ammonium.	35
Figure IV:1 Variation du pH avant et après la filtration	41
Figure IV:2 Variation de la conductivité électrique avant et après filtration.....	41
Figure IV:3 Rendement d'abaissement de la conductivité	42
Figure IV:4 Variation des teneurs en MES avant et après la filtration.....	43
Figure IV:5 Rendement d'élimination de MES	43
Figure IV:6 Variation de la turbidité avant et après la filtration.....	44
Figure IV:7 Rendement d'abaissement de turbidité.....	44
Figure IV:8 Variation des valeurs de la DCO avant et après la filtration	45
Figure IV:9 Evolution des rendements d'élimination de la DCO	46
Figure IV:10 Variation des valeurs de la DBO5 avant et après la filtration.....	46
Figure IV:11 Evolution des rendements d'abatements de la DBO5	47
Figure IV:12 Variation des teneurs en ammonium des eaux brutes et eaux filtré.....	48
Figure IV:13 Variation des concentrations des nitrites avant et après la filtration	48
Figure IV:14 Rendement d'élimination de nitrite	49
Figure IV:15 Variation des teneurs en nitrate avant et après la filtration	49
Figure IV:16 Rendements d'élimination des nitrates	50
Figure IV:17 Evolution des phosphates avec la granulométrie	51

Listes des photos

Photo I-1 : Dégrilleur courbe (Mahdjar, 2016).	7
Photo I-2 : Schéma d'un déssableur (Mahdjar, 2016).	8
Photo I-3 : déshuileur circulaire (Fecih, 2012).	9
Photo I-4 : représente des exemples des deux grands types de décanteur (Fecih, 2012).	10
Photo I-5 : schéma d'un traitement primaire (Enseeiht, site).	11
Photo III-1 : Tamisage des échantillons collectés.	20
Photo III-2 : Opération de séchage du sable.....	20
Photo III-3 : Lieu de prélèvement d'eau usée.	22
Photo III-4 : dispositif de filtration.	23
Photo III-5 : Mesure du pH.	24
Photo III-6 : La centrifugation.	25
Photo III-7 : Mesure de la turbidité.	26
Photo III-8 : Dosage des nitrates.	27
Photo III-9 : Conservation des flacons à l'obscurité.	28
Photo III-10 : Les solutions étalons des nitrites.	30
Photo III-11 : Dosage de l'ammonium.	31
Photo III-12 : Dosage des phosphates.	33
Photo III-13 : UV-Visible pour mesurer la densité optique.	33
Photo III-14 : Echauffement du mélange (échantillon + réactif).	36
Photo III-15 : Titration de l'excès de dichromate de potassium.	36
Photo III-16 : Incubation des flacons.	37

Liste des Tableaux

Tableau III-1 :Facteur de conversion de la DBO ₅ en fonction de volume de prise.	38
Tableau IV-1:L'analyse granulométrique du sable.	39
Tableau IV-2:les résultats des analyses de l'eau brute.	40
Tableau IV-3 Comparaison des résultats obtenus avec d'autres études.....	51

Liste des annexes

Tableau A. 1 Valeurs des pH des eaux avant et après filtration.....	57
Tableau A. 2 Valeurs de conductivité avant et après la filtration.....	57
Tableau A. 3 Teneurs en MES avant et après la filtration.....	57
Tableau A. 4 Valeurs de la turbidité avant et après la filtration.....	58
Tableau A. 5 Valeurs de la DCO avant et après la filtration.....	58
Tableau A. 6 Valeurs de la DBO ₅ avant et après la filtration.....	58
Tableau A. 7 Teneurs en ammonium des eaux brute et eaux filtrées.....	59
Tableau A. 8 Concentrations des nitrites avant et après la filtration.....	59
Tableau A. 9 Teneurs en nitrate avant et après la filtration.....	59
Tableau A. 10 Teneurs en ortho phosphate avant et après la filtration.....	60
Tableau A. 11 Normes Algérienne de rejet des eaux usées.....	60
Tableau A. 12 Normes des rejets internationales.....	60

Introduction générale

L'eau est une ressource vitale pour l'homme, sa santé et son développement, mais la croissance alarmante de la pollution des eaux par des matières diverses, organique ou non ; pesticides, détergents, métaux lourds et d'autres substances toxiques, qui représentent un réel danger pour la flore et la faune et causent de sérieux problèmes pour l'humanité (Belghiti et al, 2013).

Le traitement ou l'épuration des eaux usées a donc pour objectifs de réduire la charge polluante, que ces dernières véhiculent et de rejeter dans le milieu naturel des eaux d'une qualité suffisante pour altérer le moins possible le milieu récepteur .

Collectées, transportées jusqu'à un point de rejet les eaux usées doivent être épurées et traitées avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Laver l'eau après utilisation est devenu aussi indispensable que traiter nos déchets.

L'eau a de tout le temps été sans cesse recyclée par la nature, la nature ne peut plus actuellement accomplir seule le travail de nettoyage de l'eau utilisée par les hommes. Aujourd'hui, la préservation de notre environnement et celle de nos ressources en eau dépendent de notre capacité à nettoyer les eaux usées avant leurs retours dans la nature.

Face à tous les problèmes que connaît notre pays en matière d'assainissement et de gestion des stations d'épuration, le recours à d'autres techniques d'épuration, moins coûteuses et plus simples à gérer est devenu incontournable, si l'on veut protéger les ressources en eau, la santé publique et sauvegarder les milieux récepteurs.

L'utilisation de matériau local, telle que le sable des dunes comme filtre peut s'avérer être la technique de choix pour l'épuration des eaux usées au Sahara algérien.

Les filtres à sables sont des milieux naturels qui peuvent servir de massifs filtrants dans l'épuration des eaux usées, en assurant un double rôle : rétention de la MES et fixation de la biomasse qui se développe autour des grains et la biodégradation de la pollution organique, phosphorée et azotée.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence de la granulométrie du sable sur l'efficacité des filtres à sable dans le traitement des eaux usées industriel, à travers l'utilisation d'un matériau local et disponible, le sable de dune de la région de Bouda Adrar. Elle constitue également une phase indispensable pour le prétraitement des eaux usées. Ces procédés sont

Introduction générale

reconnus comme bien adaptés au milieu rural car ils présentent une bonne qualité de traitement, un fonctionnement simple et une maintenance relativement facile.

Ce travail est constitué principalement de deux parties, précédé par une introduction générale. La première partie est consacrée à l'étude bibliographique ; elle renferme donc deux chapitres.

Dans le premier chapitre, on a présenté des généralités sur les eaux usées, cette partie s'avère très importante pour comprendre les caractéristiques et le comportement des eaux usées.

Dans le deuxième chapitre une présentation des connaissances générales sur la filtration sur sable et son utilisation dans le domaine des eaux usées.

Le troisième chapitre expose le matériel et la méthodologie adoptée durant notre expérimentation.

Le quatrième chapitre concerne la présentation et l'interprétation des résultats obtenus à l'issue des expériences.

Enfin une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce travail et dégage les perspectives ouvertes par nos résultats.

I.1 Introduction

Les eaux usées sont définies comme étant, des eaux altérées par les activités humaines à la suite d'un usage domestique (eaux ménagères lessives, cuisine et bain ainsi que les eaux de vannes, industriel, artisanal, agricole ou autre (Boumedienne, 2013).

En parlant de l'eau usée il est nécessaire de donner une idée sur sa définition, son origine et ses caractéristiques, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour son épuration.

I.2 Définition des eaux usées

Les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées industrielles, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine.

Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels. Donc sous la terminologie d'eau résiduaire, on groupe des eaux d'origines très diverses qui ont perdu leurs puretés ; c'est-à-dire leurs propriétés naturelles par l'effet des polluants après avoir été utilisées dans des activités humaines (domestiques, industrielles ou agricoles) (Bengouga, 2010).

I.3 Origine des eaux usées

Suivant la source ou l'origine des substances polluantes qu'elle contient, on distingue quatre catégories d'eaux usées :

- ✚ Les eaux usées domestiques ;
- ✚ Les eaux usées industrielles ;
- ✚ Les eaux usées pluviales ;
- ✚ Les eaux usées agricoles.

I.3.1 Les eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques, ...etc. Les eaux de vannes sont les rejets des toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux (Kendouci, 2017).

I.3.2 Les eaux usées industrielles

Les eaux usées industrielles sont très différentes par rapport aux eaux usées domestiques. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus des matières organiques azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques ou des hydrocarbures (Melquiot, 2003).

I.3.3 Les eaux agricoles

L'agriculture est une source de pollution des eaux, car elle est la principale utilisateur des engrais et des pesticides (Melquiot, 2003).

I.3.4 Les eaux pluviales

On entend par eaux pluviales, les eaux provenant du ruissellement des toitures, des terrasses, des parkings et des voies de la circulation. Leur destination est le milieu naturel. C'est pourquoi, leur évacuation doit être complètement distincte de celle des eaux usées. La canalisation d'eau pluviale dispose d'une capacité 4 fois plus importante qu'un réseau d'eau usées afin de pouvoir absorber les variations de volume lors des précipitations (Jerome, 1997).

I.3.5 Composition des eaux usées

Les principaux constituants des eaux usées que les traitements vont tenter de diminuer sont (Guy 2017):

- ✚ les matières en suspension (MES);
- ✚ l'azote et le phosphore (mg/l);
- ✚ les métaux lourds, les graisses et détergents;
- ✚ les germes et les virus;
- ✚ les matières oxydables (pollution carbonée).

I.4 Caractéristiques des eaux usées

Les normes de rejet des eaux usées définissent des indicateurs de qualité physicochimique et biologique. Ce potentiel de pollution généralement exprimé en mg/l, est quantifié et apprécié par une série d'analyses. Certains de ces paramètres sont indicateurs de modifications que cette eau sera susceptible d'apporter aux milieux naturels récepteurs. Pour les effluents domestiques, industriels et naturels, on peut retenir les analyses suivantes:

I.4.1 Paramètres Physico-chimique

I.4.1.1 La température

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci 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, (Rodier et al., 2009).

I.4.1.2 La turbidité

La turbidité est liée à la présence plus ou moins importante de matières en suspension d'origine minérale ou organique.

La turbidité des effluents résiduaux et des eaux polluées est en générale très élevée, elle ne peut, de ce fait être exprimée en gouttes de silice ou de mastic. La turbidité est donc définie par absorptiomètre (Rodier et al., 2009).

I.4.1.3 La conductivité

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations.

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm². L'unité de conductivité est le siemens par mètre (S/m) ((Belghiti et al., 2013).

I.4.1.4 Le pH (potentiel hydrogène)

Le pH d'une eau représente son acidité ou alcalinité. Les eaux usées domestiques sont généralement neutres ou basiques, de (6 à 9), donc elle n'influe pas sur le pH de milieu récepteur mais les affluents industriels constituent un facteur très important dans la modification de la valeur de pH, (Rodier et al., 2009).

I.4.1.5 Demande biologique en oxygène (DBO₅)

Exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation des matières organiques présentes dans les eaux usées par les microorganismes du milieu. Elle est mesurée par la consommation d'oxygène à 20°C à l'obscurité pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon

préalablement ensemencé, le temps nécessaire qui assure l'oxydation biologique des matières organiques carbonées (Berne and Cordnner, 1991)

I.4.1.6 Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène consommée par les matières organiques biodégradables ou non biodégradables, ainsi que toutes les matières oxydables existantes dans l'eau dans des conditions opératoires bien définies. En fait, la mesure de la DCO correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau, quel que soit leur origine organique ou minérale (fer ferreux, nitrites, ammonium, sulfures et chlorures) .

DCO permet donc d'apprécier la concentration en matières organiques ou minérales dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers de la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale. Ainsi, par la mesure de la DCO, on pourra évaluer la charge polluante d'une eau usée en matières organiques avant et après un traitement physique, chimique ou biologique afin de contrôler le fonctionnement d'une STEP et l'activité des micro-organismes (Berne and Cordnner, 1991).

I.4.1.7 Phosphore

Le phosphore est présent dans l'eau sous diverses formes : phosphore soluble réactif souvent assimilé à l'orthophosphate, polyphosphates, phosphore organique, ou inorganique. Il est exprimé en mg de phosphore élémentaire par litre d'effluent (Musy and Higy, 2004).

I.4.1.8 L'Azote

La présence de nitrates dans l'eau est principalement attribuable aux activités humaines (Santé Canada, 1997).

L'utilisation de fertilisants synthétiques et de fumiers, associée aux cultures et à l'élevage intensifs, favorise l'apparition de nitrates dans l'eau. Les installations septiques déficientes, de même que la décomposition de la matière végétale et animale, peuvent aussi être une source de nitrates dans l'eau (Levallois and Phneuf, 1994). Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux provenant en grande partie de l'action de l'écoulement des eaux sur le sol constituant le bassin versant. Leurs concentrations naturelles ne dépassent pas 3 mg/L dans les eaux superficielles et quelques mg/l dans les eaux souterraines. La nature des zones de drainage joue donc un rôle essentiel dans leur présence et l'activité humaine accélère le processus d'enrichissement des eaux en nitrates (Abibsi, 2011).

I.5 Traitement des eaux usées

Les méthodes de traitement des eaux usées sont diverses et peuvent être classées en trois catégories : les traitements primaires, secondaires et tertiaires. On peut également tenter une classification physique et biologique qui revient grossièrement à distinguer d'un côté les traitements primaires et de l'autre les traitements secondaires et tertiaires.

I.5.1 Les prétraitements

Les prétraitements sont une phase d'épuration grossière. On élimine tous les éléments solides volumineux et grossiers (sables, corps gras) qui pourraient d'ailleurs endommager les installations par la suite. Notons qu'on retire alors environ 35 % des éléments polluants (Crini and Badot, 2008).

I.5.1.1 Le dégrillage

Il s'agit de retenir les déchets solides qui peuvent arriver à la station d'épuration en faisant passer l'effluent à traiter à travers des grilles espacées de quelques centimètres, afin de protéger les ouvrages en aval (Photo I-1).

L'opération peut être plus au moins efficace en fonction de l'écartement des barreaux des grilles, on distingue (Nedjah, 2016):

- ✚ Dégrillage fin, pour un écartement de 3 à 10 mm;
- ✚ Dégrillage moyen, pour un écartement de 10 à 25 mm;
- ✚ Pré dégrillages, pour un écartement de 30 à 100 mm.



Photo I-2 : Dégrilleur courbe (Mahdjar, 2016).

I.5.1.2 Le dessablage

Après dégrillage, il reste encore dans l'eau des fragments solides qui peuvent décanter facilement, mais dont la dureté et la taille relativement importante, supérieure à 0.2 mm de diamètre, pourraient conduire à l'abrasion de certains éléments de la station et particulièrement des pompes. On élimine ces matériaux facilement décantables dans des petits bassins rectangulaires ou circulaires.

Les sables ainsi séparés pourront être mélangés aux autres boues sans problèmes majeurs si ce n'est qu'ils sont fermentescibles (Photo I-3) (Gamrasni, 1981).



Photo I-4 : Schéma d'un déssableur (Mahdjar, 2016).

I.5.1.3 Déshuilage

Les eaux usées urbaines contiennent souvent des matières flottantes qui passent à travers les grilles (huiles, hydrocarbures, débris de graisse, fragments de matières plastique...). Le déshuilage a pour but de séparer de l'eau, par flottation, les matières ou les liquides dont la densité est inférieure à l'unité. Les huiles et les hydrocarbures forment une couche mince en surface et gênent ainsi le processus d'aération dans la cas des boues activées, quant aux matières flottantes solides elles risquent de former des bouchons qui pourraient obstruer des canaux ou des orifices dans la station, il est donc nécessaire de piéger ces substances au niveau de prétraitement par un dispositif d'écumage (Photo I-3) (Gamrasni, 1981).



Photo I-5 : déshuileur circulaire (Fecih, 2012).

I.5.2 Traitements physico-chimiques

I.5.2.1 La décantation

Pour faciliter la précipitation des matières en suspension de diamètre inférieur à 0.2 mm, on fait circuler l'eau lentement dans un bassin dont on racle ou aspire périodiquement les matériaux rassemblés au fond.

Dans la plupart des stations d'épuration on effectue deux décantations:

L'une sur les eaux issues du prétraitement l'autre après le traitement biologique (ou chimique). Dans ce paragraphe il ne sera question que des boues de décantation primaire car les autres dépendent du traitement subi par l'eau. Les boues formées contiennent une forte proportion de matières organiques (de 20 à 30% des matières sèches, des matières grasses 6 à 30%). Ces boues présentent un aspect non homogène, elles sont généralement brunes et d'odeur désagréable (Gamrasni, 1981).

Il existe deux grands types de décanteur : Les décanteurs à flux horizontal et Les décanteurs à flux vertical (Photo I-4).

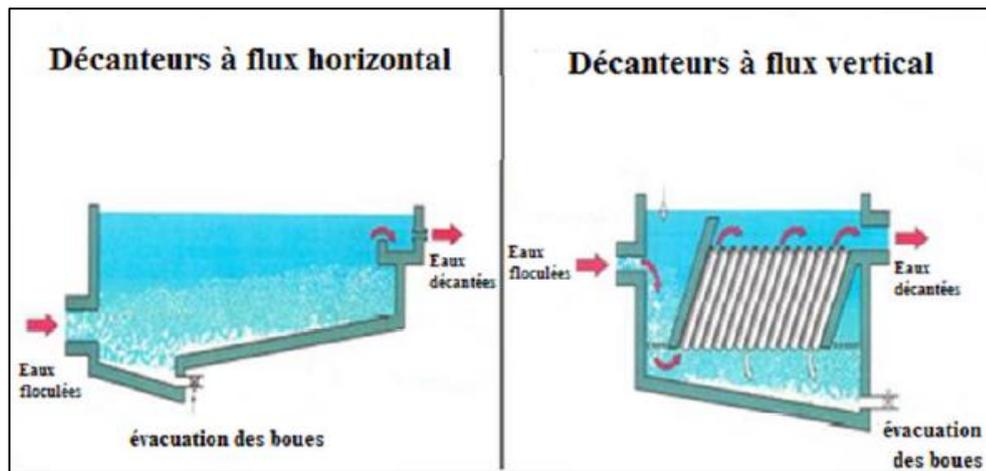


Photo I-6 : représente des exemples des deux grands types de décanteur (Fecih, 2012).

I.5.2.2 Coagulation-floculation

➤ Coagulation

S'obtient par addition dans l'eau d'un réactif chimique le sel d'aluminium ou de fer qui neutralise les charges électriques superficielles répulsives, et permet ainsi leur agglomération. Celle-ci est accélérée par l'ajout d'un polymère, sorte de macromolécule à longue chaîne qui emprisonne les matières colloïdales agglomérées en flocons volumineux qui se déposent par gravité. C'est le floc (Desjardins, 1997).

➤ Floculation

La floculation a pour objectif de favoriser à l'aide d'un mélange lent les contacts entre les particules déstabilisées, ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation. Une coagulation-floculation, suivie d'une décantation appliquée sur une eau domestique, permet d'éliminer jusqu'à plus de 90% des matières en suspension et de 40 à 65 % de la DBO₅ (Photo I-7) (Desjardins, 1997).

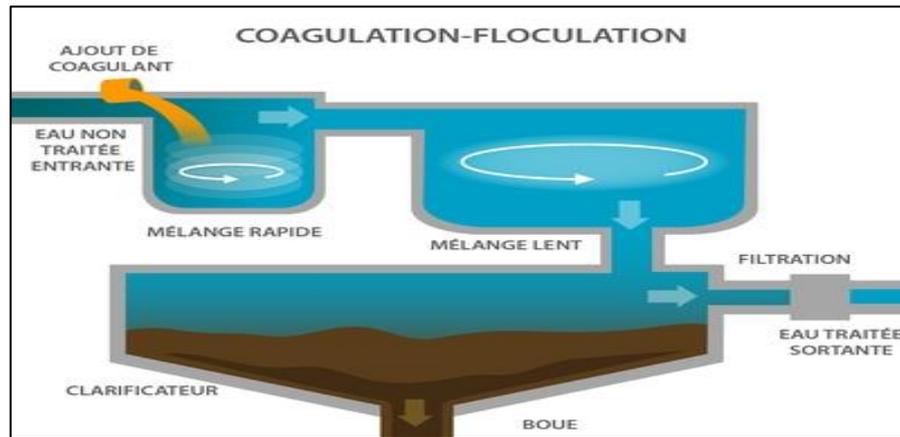


Photo I-8 : schéma d'un traitement primaire (Enseeiht, site).

I.5.3 Traitement secondaire (traitement biologique)

Ce traitement consiste à une consommation de la matière organique contenue dans les eaux usées et d'une partie des matières nutritives (azote et phosphore) par des microorganismes. En distingue différents types ;

I.5.3.1 Le lagunage naturel

Les eaux usées sont stockées dans des plans d'eau peu profonds : les lagunes. L'activité microbienne se fait naturellement : échange avec l'atmosphère, photosynthèse... des aérateurs peuvent être utilisés pour brasser l'air et optimiser l'activité des bactéries.

Ces processus induisant la formation de boues de lagunage au fond des bassins qui sont récupérées.

I.5.3.2 Les boues activées

On force ici le mélange du dioxygène, des eaux usées et des bactéries dans des bassins. Les espèces sont sélectionnées selon ce que l'on souhaite éliminer : carbone, azote, phosphore. Les bactéries et leur déchet de métabolisme forment, dans un bassin appelé clarificateur, des boues (boues secondaires) qui sont ensuite traités et utilisés pour la fertilisation des sols par exemple.

Une partie de ces boues retourne dans les bassins pour éviter une trop grande perte en bactérie (Patrick, 2009).

I.5.4 Les traitements tertiaires

Certain rejet d'eaux traitées sont soumis à des réglementations spécifiques concernant l'élimination d'azote, de phosphore ou des germes pathogènes, qui nécessitent la mise en

œuvre des traitements tertiaires, opération physique et chimique qui complétant les traitements primaire et secondaire (Attab, 2011).

I.5.4.1 La désinfection

Un abaissement de la teneur des germes, parfois exigé pour les rejets dans des zones spécifiques (zones des baignades, zones des conchylicoles) ou dans le cadre d'une réutilisation, il sera réalisé par des traitements de des désinfections chimique par : le clore, l'ozone (O₃), les rayons ultraviolets (Attab, 2011).

I.5.4.2 La filtration

Est un procédé physique qui permet de retenir les microorganisme par rétention à l'aide d'un filtre. Qu'elle soit réalisée sur sable ou sur membrane, cette technique exige une épuration secondaire préalable garantissant une élimination assez poussée des matières en suspensions. L'élimination des virus, des bactéries et des protozoaires est fonction de milieu poreux, de la vitesse de percolation, de l'épaisseur du massif filtrant et du niveau d'oxydation de l'eau filtrée (Degrémont, 2005).

I.6 Conclusion

Les conséquences de la pollution des eaux usées sont multiples, que ce soit directement ou indirectement sur l'homme ou sur le milieu où il vit.

L'assainissement des eaux usées, répond donc à ces deux préoccupations essentielles en vue de préserver les ressources en eaux et le cadre de vie. Une station d'épuration est installée généralement à l'extrémité d'un réseau de collecte, à la sortie des eaux usées vers le milieu naturel. Elle comporte une succession de dispositifs empruntés tour à tour par les eaux usées. Chaque dispositif est conçu à éliminer une partie des polluants contenus dans les eaux usées.

II.1 Introduction

La filtration est un procédé permettant de séparer un solide en suspension, par exemple un précipité, du liquide dans lequel il se trouve, en filtrant le solide à travers un milieu poreux qui peut être facilement pénétré par les liquides. la filtration est un procédé de fabrication de base dans l'industrie chimique; elle a également de nombreuses applications, telles que le brassage du café , la clarification du sirop de sucre, l'épuration des eaux d'égout. le solide à filtrer est appelé suspension. Le liquide qui est passé à travers le filtre est appelé filtrat. Il existe on générale quatre types de filtration dans les procédés de séparations par filtrage.

Les filtres granulaires, tels que le sable ou le charbon de bois broyé, les feuilles poreuses et rigides, tels que ceux qui se forment en chauffant la brique ou l'argile à basse température, et enfin, les filtres composés de membranes semi-perméables ou pénétrables, telles que les membranes animales les filtres du dernier type sont utilisés pour séparer par dialyse les solides dispersés..

II.2 Filtration sur sable

II.2.1 Définition de la filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide qui contient des matières solides en suspension, en le faisant passer à travers un milieu poreux. Si ces matières à retenir sont de dimensions supérieures à celle des pores de filtre, elles sont retenues à la surface et la filtration est dite « en surface », ou en « gâteau » ou en encore « sur support ». Les matériaux filtrants utilisés dans ce cas sont : des tissus de fibres ou membranes, des toiles métalliques ou des pierres poreuses à interstices très fins (Colomb, 1989).

Dans le cas contraire, les matières en suspension sont retenues à l'intérieur de la masse poreuse, et la filtration est dite « en volume » ou « en profondeur » ou encore « sur lit filtrant ». Les matériaux filtrants utilisés cette fois sont des granules libres qui n'adhèrent pas les unes aux autres. Ces matériaux doivent être insolubles et inattaquables ni par l'eau filtrée ni par les impuretés qui se déposent sur le filtre. Le sable, l'antracite et l'ilménite sont couramment utilisés dans les usines de traitement des eaux. Les solides en suspension ainsi retenus par le milieu poreux s'y accumulent ; il faut donc nettoyer ce milieu de façon continue ou de façon intermittente (Ezziane, 2007).

II.2.2 Principe de filtration

La rétention des particules se déroule à la surface des grains, grâce à des forces physiques. La facilité de fixation dépend étroitement des conditions d'exploitation du filtre et du type de matériaux utilisés. L'espace inter granulaire définit la capacité de rétention du filtre. Au fur et à mesure du passage de l'eau, cet espace se réduit, le filtre colmate et les pertes de charges augmentent fortement. Il faut alors déclencher le rétro lavage, la biomasse qui se développe sur le matériau filtrant, peut efficacement réduire le taux d'ammonium de l'eau par la nitrification. La filtration permet une élimination correcte des bactéries, de la couleur et de la turbidité et indirectement les odeurs (Attab, 2011).

II.3 Constitution d'un filtre

Tous les filtres sont composés de trois parties on générale ; d'un fond qui doit être solide pour supporter le poids de l'eau, du sable et du gravier. Il doit permettre aussi, la collecte et l'évacuation de l'eau filtrée. Le support en gravier a pour rôle de retenir le sable et d'améliorer la distribution de l'eau de lavage dans le filtre. Ensuite, le matériau filtrant ou le matériau utilisé sont constitués par des granules libres non adhérents les uns aux autres, insolubles, inattaquables par le liquide filtré ni par les particules solides retenues (Attab, 2011).

II.3.1 La nature du milieu poreux

Le sable quartzéux a été le premier des matériaux utilisés pour la filtration et il reste encore le matériau de base pour la plupart des filtres actuels. Certains filtres utilisent une combinaison de plusieurs matériaux (filtres multicouches), le sable peut alors être associé à de l'antracite, du grenat, des schistes plus au moins poreux. Enfin la filtration peut s'effectuer sur du charbon actif granulé, suffisamment résistant (Degremont, 2005).

II.3.2 Types des filtres

Dans le domaine de traitement des eaux potables, il existe principalement deux types de filtration sur sable.

- La filtration lente (filtres à sable lent) laquelle les vitesses normales sont de 2 à 7 m/jour ;
- La filtration rapide (filtres à sable rapide) dont les vitesses peuvent atteindre de 3 à 20 m/h (Kendouci, 2017).

II.3.3 La filtration rapide

Le filtre à sable rapide est le type le plus utilisé dans le traitement des eaux de consommation. Le matériau filtrant est maintenu en place par gravité et l'écoulement de l'eau se fait de haut en bas. Lorsque le milieu filtrant est colmaté, on lave le filtre en inversant le sens de l'écoulement de l'eau de lavage.

Le milieu filtrant est alors en expansion, et les particules d'impureté beaucoup moins denses que les grains de sable, sont décollées et évacuées vers l'égout à l'aide des goulottes de lavage. Les principaux éléments d'un filtre rapide sont (Kendouci, 2017).

II.3.3.1 Constitution d'un filtre rapide

Tout filtre rapide est composé de trois parties ; on trouve le fond, le gravier, et le matériau filtrant (Rakotomaria et al., 2011).

- Le fond de filtre est la structure qui sépare le milieu filtrant de l'eau filtrée. Il doit donc être suffisamment solide pour supporter le milieu filtrant (1 m de sable et de gravier) et aussi l'eau située au-dessus du milieu filtrant (2 m d'eau). Il permet en outre ; de collecter, d'évacuer les eaux filtrées, et de distribuer uniformément l'eau de lavage;
- Le gravier de support, situé immédiatement au-dessus du fond de filtre, il permet de retenir le sable du milieu filtrant et d'améliorer la répartition de l'eau de lavage dans le filtre ;
- Milieu filtrant : qui permet la rétention des impuretés des eaux brutes. Le plus souvent c'est du sable ou de l'anhracite. La couche filtrante est de 60 à 90 cm d'épaisseur, le diamètre effectif des grains varie de 0,35 à 0,50 mm et le coefficient d'uniformité varie de 1,3 à 1,7.

II.3.3.2 Colmatage des matériaux filtrant

L'adsorption et la rétention des impuretés par le matériau filtrant provoquent un grossissement des grains, réduisant la taille des espaces interstitiels et donc la section de passage offerte à l'eau. Ce phénomène s'accroît jusqu'à ce que le filtre se colmate complètement et par conséquent les pertes de charges augmentent à leurs tours . Si le filtre fonctionne à pression d'alimentation constante, le débit du filtrant se baisse au cours du temps, et afin de maintenir se débit constant, il faut augmenter la pression initiale au fur et mesure du colmatage (Fecih, 2012). La rapidité de colmatage dépend :

- De la nature des eaux traitées.
- Du débit par unité de surface filtrante ou vitesse de filtration.
- De la granulométrie de la matière filtrante.

II.3.4 La filtration lente

On utilise la filtration lente sur sable depuis le début des années 1900. Cette méthode est toujours largement employée pour le traitement des eaux usées municipales.

Des études avec d'autres observations ont montré que la filtration lente sur sable permet d'éliminer efficacement les bactéries coliformes des eaux usées et constitué un procédé de traitement innovateur et rentable qui exige peu d'entretien. Ce système est le plus efficace dans le cadre d'une approche comportant des traitements multiples.

Un filtre à sable lent comprend un lit de sable reposant sur une couche de gravier. Ce milieu de filtration est contenu dans une boîte comportant, deux extrémités, des ouvertures permettant à l'eau d'entrer et de sortir sous l'effet de la gravité. Au niveau de ce procédé de filtration, une forme de traitement naturel et biologique de l'eau est utilisé pour éliminer les solides, les précipités, la turbidité et, dans certains cas, les bactéries responsables du goût et de l'odeur désagréables (Kendouci, 2017).

II.3.4.1 Caractéristiques des filtres lents

Les filtres à sable lents, doivent être construits, de telle sorte que l'eau traverse lentement une couche de sable fin, et que les particules les plus grosses soient arrêtées près de la surface du sable. Ces particules forment une couche poreuse très fines, dont la surface totale de veinule ou de pores est très grande. Ce qui facilite l'absorption des impuretés par cette couche ou par le sable sous-jacent effectivement. Cette couche poreuse est constituée de bactéries, d'algues et de protozoaires. La filtration lente combine donc les effets de processus physiques, et de processus biologiques .

Les filtres à sable lents fonctionnent principalement grâce à l'activité biologique, mais également au captage des particules dans le filtre à sable. Les caractéristiques fondamentales des filtres à sable sont le sable fin et la vitesse de filtration lente.

A mesure que l'eau passe à travers le filtre, un film constitué de poussières, de débris et de micro-organismes vivants et en décomposition s'accumule à la surface du sable. La poussière, les particules et les micro-organismes naturels s'accumulent dans cette pellicule et

contribuent à la filtration, mais ils en ralentissent le débit. Par conséquent les filtres de ce type sont de plus grandes tailles que les filtres rapides.

La lenteur du débit de filtration (0.1 à 0.3 m/h) et le film biologique rendent ce type de filtre très efficace de façon à en extraire les minuscules particules de l'eau.

Les microorganismes qui se développent dans le film biologique et dans les premiers centimètres de la couche du sable captent et décomposent d'autres micro-organismes, minéraux ou nutriments, notamment le fer. Le filtre laisse passer certains organismes et matières solubles. Pour remédier à l'obstruction, il faut enlever le film biologique et gratter les premiers centimètres de sable (Djeddou, 2014).

II.3.4.2 Avantages des filtres lents

- Les filtres lents permettent de ne pas recourir à la coagulation .
- Les matériaux de construction de ces filtres sont simples ; ils sont disponibles sur place
- On peut aisément se procurer du sable sur place.
- La surveillance du fonctionnement de ces filtres est simple .
- Ils éliminant bien les bactéries.

II.3.4.3 Inconvénients des filtres lents

Les filtres lents occupent une grande superficie. Ils exigent une installation de grandes dimensions, un volume de sable important et des travaux coûteux .

Leur exploitation manque de souplesse, leur mise en exploitation et leurs lavages requièrent des périodes trop longues, au cours desquels ils sont inutilisables. Ils décolorent médiocrement les eaux colorées .

Ils donnent de mauvais résultats lorsque les eaux sont riches en algues et n'ont pas été préalablement traitées.

L'ensemble de ces inconvénients pèse peu par rapport aux avantages de la filtration lente. Cependant la surveillance, le contrôle et la vigilance comme pour n'importe quel procédé sont l'unique moyen de surmonter ces inconvénients (Maazouzi, 2010).

Le traitement à choisir reste dépendant des concentrations minimales qu'on veut obtenir et de l'état de pollution en micropolluants de l'eau à traiter; pour cela une quantification et une caractérisation des polluants sont nécessaires au préalable (Djeddou, 2014).

II.3.5 Mécanisme de la filtration

Dans la filtration on distingue principalement deux mécanismes de filtration :

II.3.5.1 Mécanismes physiques

Il existe six mécanismes de transports différents susceptibles d'amener des particules en suspension en contact avec la structure fixe du milieu filtrant qui sont :

- **Interception** : il y a un choc entre les particules et un grain fixe .
- **Diffusion** : les particules les plus petites sont soumises à un mouvement brownien qui peut les amener au contact d'un grain .
- **Tamisage** : les particules les plus grosses peuvent être éliminées par tamisage à l'entrée d'un port .;
- **Inertie** : l'inertie de la particule la pousse à continuer en ligne droite quand bien même le courant d'eau qui l'entraîne s'incurve pour contourner un grain ;
- **Décantation** : l'effet de la gravité sur une particule peut l'amener à prendre une trajectoire différente des lignes d'eau et venir au contact d'un grain .;
- **Hydrodynamiques** : les particules sont soumises sous l'action de diverses forces d'origine hydrodynamiques

II.3.5.2 Mécanisme biologique

Lorsqu'une eau ruisselle sur un support solide, il se forme sur ce support un film biologique qui recouvre sa surface, ce film est composé de bactéries et de champignons qui se nourrissent de la pollution organique .

Cette pellicule constitue la biomasse active qui absorbe les contaminants organiques de l'effluent pour les assimiler et les minéraliser (Ouali, 2001).

II.4 Conclusion

On peut dire qu' à partir d'une eau usée et grâce aux procédés de traitement, il est possible d'obtenir toute une gamme d'eaux de qualités différentes. A chacune de ces qualités peut correspondre un usage particulier. Il est clair que les traitements qui existent peuvent réduire les concentrations des polluants sous toutes leurs formes, à des niveaux qui sont actuellement considérés comme non dangereux.

III.1 Introduction

Les différents travaux effectués dans le cadre de cette étude ont été réalisées au niveau du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et le laboratoire de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en milieu saharien d'Adrar (URER-MS).

III.2 Préparation du filtre du sable

La préparation du milieu filtrant nécessite plusieurs étapes, comme le lavage afin d'éliminer toutes les impuretés et le tamisage pour déterminer les différentes tailles des grains du sable.

III.2.1 Echantillon du sable utilisé

Les échantillons des sables utilisés au cours de ce travail, sont collectés au niveau de l'Erg de la région Bouda Adrar, située à l'Ouest à 5 km environ du chef-lieu d'Adrar. Ces prélèvements ont été faits de trois endroits différents à savoir, le sommet, le milieu et en bas de la dune afin d'avoir un échantillon de sable représentatif, ensuite, ils sont bien mélangés.

III.2.2 Analyse granulométrique du sable

La granulométrie ou l'analyse granulométrique est une opération qui permet la détermination de la répartition des particules d'un échantillon en fonction de leur dimension. Elle consiste à fractionner des granulats ou moyen d'une batterie de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas de 630 μm à 80 μm .

On appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains de sable qui passent à travers le tamis, et refus l'ensemble des grains qui sont retenus par le tamis.

Mode opératoire

-  Emboîter les tamis utilisés les uns sur les autres, les dimensions croissantes de bas en haut ;
-  Mettre au-dessous un récipient à fond plein pour recueillir les éléments fins, et au-dessus un couvercle pour éviter la dispersion des poussières ;
-  Verser le sable dans le tamis supérieur, mettre le couvercle, et appliquer à l'ensemble une série de secousses à l'aide d'un tamiseur. Le granula sera ainsi réparti sur les différents tamis;
-  Peser le refus de chaque tamis séparément et ensuite, calculer les refus cumulés ;

- ✚ Retrouver le poids pesé au départ, aux pertes près ;
- ✚ Noter tous les résultats trouvés dans un tableau.

Les échantillons collectés pendant l'opération du tamisage sont représentés sur la figure suivante (Photo III- 1).



Photo III-1 : Tamisage des échantillons collectés.

III.2.3 Lavage de l'échantillon

Après le tamisage, les fractions du sable ont été lavées avec de l'eau distillée afin d'éliminer toutes les impuretés, puis séchées à l'étuve à une température de 120 °C pendant 12 h. L'opération de cette étape est représentée sur la figure suivante (Photo III -2).



Photo III-2 : Opération de séchage du sable.

III.3 Colonnes de filtration

Les colonnes de filtration sont constituées d'un tube en PVC d'une hauteur de 40 cm et un diamètre de 60 mm (Figure III- 1). Elles sont ouvertes en haut et fermé en bas par un tissu pour éviter l'immigration des particules de sable et faciliter l'évacuation des eaux filtrées. Les colonnes sont bien fixées à des supports métalliques par des pinces.

Le rôle de ces supports est d'assurer la stabilité et le placement vertical des colonnes ; pour favoriser l'écoulement vertical et pour avoir un fonctionnement avec les mêmes conditions du début jusqu'à la fin de l'expérience.

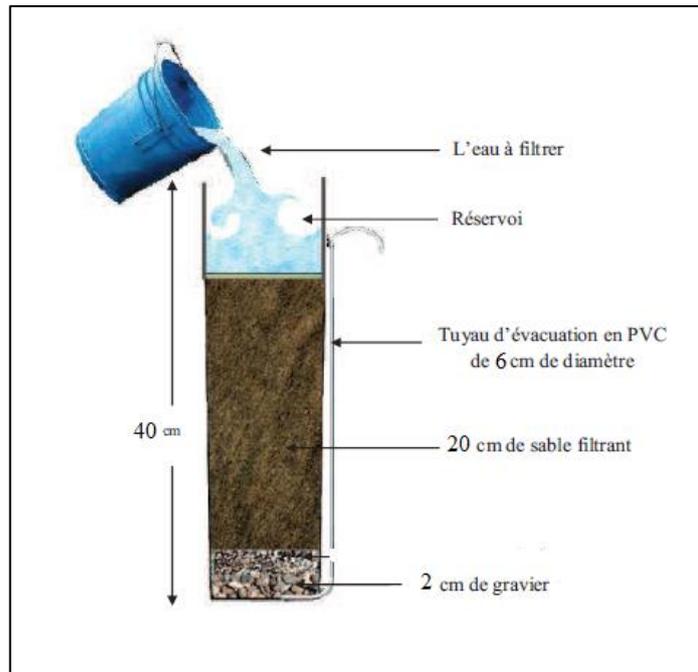


Figure III:1 : Coupe du filtre à sable utilisé.

III.3.1 Montage des colonnes

Pour la préparation des colonnes, on commence par le placement du tissu en bas de chaque colonne ensuite on met une couche de gravier d'une épaisseur de 2 cm, qui a pour rôle de faire passer l'eau et de retenir les particules de sable, puis on ajoute du sable préparé précédemment jusqu'à une hauteur de 20 cm.

III.4 Prélèvement des eaux usées industrielle

L'eau usée utilisée dans cette étude est d'origine industrie de l'usine du Groupe Touat Gaz de Hassi Ilatou. Elle est prélevée dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser et fermés hermétiquement sans laisser des bulles d'air dans le flacon. Ces

derniers peuvent être en verre ou en polyéthylène ; la figure suivante (Photo III- 3) qui représente le lieu de prélèvement d'eau usée (Hassi Ilatou).



Photo III-3 : Lieu de prélèvement d'eau usée.

III.5 Déroulement de l'expérience

Une fois que les colonnes sont montées sur les supports. Des récipients de récupération des filtrats sont placés au bas de chaque colonne. On verse ensuite 1000 ml d'eau usée à traiter. Les opérations de filtration ont été effectuées dans les mêmes conditions opératoires pour éviter toute interférence.

Nous avons choisi cinq diamètres du sable 125 μm , 200 μm , 250 μm , 400 μm , 500 μm , (Photo III-5) et aussi nous avons fait deux essais pour chaque diamètre, les résultats obtenus sont la moyenne de celles-ci.



Photo III-4 : dispositif de filtration.

III.5.1 Analyses des paramètres physico-chimiques de l'eau

III.5.1.1 Mesure du pH

La mesure du pH a été effectuée 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 (Rejsek, 2002).

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 agitation, Nous lisons directement le pH lorsque sa valeur est stabilisée. Le montage est donné par la figure suivante (Photo III- 5).



Photo III-5 : Mesure du pH.

III.5.1.2 Mesure de 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, Elle est l'inverse de la résistivité électrique (ρ) (Rodier et al, 2009).

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} \times \frac{L}{S} \quad (1)$$

Avec :

γ : conductivité (en Ω, m^{-1} ou S, m⁻¹) ;

ρ : résistivité (en Ω, m) ;

R : résistance (en Ω) ;

L : distance entre les deux électrodes (en m) ;

S : surface de chaque électrode (en m²).

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 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Rodier et al, 2009).

III.5.1.3 Détermination de la matière en suspension (MES)

L'eau est centrifugée à environ $3000 \times g$ (soit 4000 trs/min pour un rayon de centrifugation de 10 cm) pendant 20 minutes, Le culot recueilli, séché à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Rodier et al, 2009).

✚ Mode opératoire

Tout d'abord, on sèche les tubes à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, puis on pèse après refroidissement et on note sa masse à vide M_0 . Ensuite on centrifuge un volume d'eau, d'une prise d'essai (10 ml) pendant 20 min à 4000 trs/min (Photo III- 6).

On sépare alors le liquide surnageant par siphonage sans perturbation du dépôt, On sèche à l'étuve pendant 2h à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, On pèse après refroidissement au dessiccateur et on note sa masse M_1 (Rodier et al, 2009).



Photo III-6 : La centrifugation.

✚ Expression des résultats

Le taux des matières en suspension (MES), exprimé en milligramme par litre (mg/L) est donné par l'expression :

$$C_{MES} = (M_1 - M_0) \times \frac{1000}{V} \quad (2)$$

C_{MES} : concentration de la MES en mg/l ;

M_0 : la masse de tube vide ;

M_1 : la masse de tube pleine après dessiccation à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$;

V : le volume d'eau traitée en ml.

III.5.1.4 Détermination de 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 (Rodier et al, 2009).

✚ Mode opératoire

On met l'appareil sous tension et après rinçage plusieurs fois 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 en NTU s'affiche (Photo III- 7).



Photo III-7 : Mesure de la turbidité.

III.5.1.5 Détermination des nitrates NO_3^-

Les nitrates sont réduits en nitrites par une solution d'hydrazine en milieu alcalin et en présence du sulfate de cuivre comme catalyseur.

Les nitrites obtenus sont alors dosés par colorimétrie : diazotation avec l'acide sulfanilique et copulations avec l' α - Naphtylamine. On mesure la densité du colorant ainsi formé à 520 nm (Richardson and Ternes, 2014).

✚ Réactifs

- ✓ Solution mère de nitrates à 1000 mg/l :

Dissoudre 1,631g de nitrates de potassium préalablement séchés au dessiccateur et compléter à 1000 ml par de l'eau distillée,

- ✓ Solutions étalons :

Prendre successivement : 0,5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 et 15 ml de la solution mère de nitrate et compléter chaque prélèvement à 100 ml par de l'eau distillée, On obtient alors des solutions étalons contenant respectivement : 5, 10, 20, 40, 60, 80 ,100 et 150 mg/l de nitrates (Photo III 8) (Rodier et al, 2009).



Photo III-8 : Dosage des nitrates.

- ✓ Solution de soude à 0,05 M,
- ✓ Mélange réducteur à préparer au moment de l'emploi :
 - 5 ml de la solution de Sulfate de Cuivre,
 - 5 ml de la solution d'hydrazine,
 - Eau distillée Q, S, P 200 ml,
- ✓ Mélange colorant (conserver en flacon brun) :
 - 10 ml d'acétone,
 - 20 ml d'acide sulfanilique,
 - 20 ml d'E, D, T, A,
 - 20 ml d'acétate de sodium,
 - 20 ml d' α -Naphthylamine,
 - Eau distillée Q, S, P 1000 ml,

Ajouter l' α -Naphthylamine en dernier et après une dilution pour éviter la formation d'un précipité blanc laiteux, et compléter avec l'eau distillée à 1000 ml.

Mode opératoire

De préférence, on effectue le dosage dans des flacons bruns et on réalise le mélange suivant en introduisant dans le flacon : 1 ml prise d'essai, 5 ml de solution de soude à 0,05 M,

après l'agitation on ajoute, 5 ml de mélange réducteur, encore une fois on agite ce dernier mélange.

Après une heure, on ajoute 40 ml du mélange colorant, et on met à l'obscurité pendant 15 min (Photo III- 9), finalement on mesure la densité à 520 nm (Rodier et al, 2009) .



Photo III-9 : Conservation des flacons à l'obscurité.

Expression des résultats

La courbe donne directement les teneurs en azote nitriques des échantillons exprimés en mg/l.

III.5.1.6 Détermination des nitrites NO_2^-

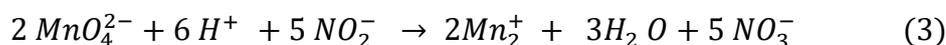
Par diazotation des nitrites avec l'acide sulfanilique à pH 2,5 puis par copulation du composé formé avec l' α -Naphthylamine, on obtient un colorant azoïque rouge stable au moins 12 heures dont on mesure l'intensité à 520 nm (Rodier et al, 2009).

Réactifs

- Solution d'acide sulfanilique ;
- Solution d' α -naphthylamine ;
- Solution tampon d'acétate de sodium ;
- Solution d'E, D.T.A à 5 g/l ;
- Solution mère étalon des nitrites à 100 mg/l:
 - Eau distillée Q.S.P 1000 ml ;
 - 150 mg de nitrite de sodium ; On les conserve en y ajoutant 1ml/l de chloroforme.

✚ Titrage de la solution mère de nitrite

Le nitrite est oxydé au moyen d'un excès de permanganate, L'excès d'oxydant est ensuite dosé par iodométrie (Rodier et al, 2009).



Tout d'abord on fait le mélange suivant dans un bécher : 10 ml de permanganate de potassium à 0,01 N, avec 2 ml d'acide sulfurique dilué au 1/2, et 20 ml de solution de nitrite. Après l'agitation on ajoute 5 ml d'iodure de potassium à 10 %. La concentration de la solution mère de nitrite exprimé en mg/l, est donnée par :

$$[NO_2^-] \text{ en mg /l} = \frac{(T_{\text{thiosulfate de sodium}} \times (V_0 - V) \times 23000}{PE} \quad (4)$$

Avec :

V_0 : le volume trouvé pour un témoin effectué avec de l'eau distillé (ml) ;

V : le volume de thiosulfate de sodium nécessaire pour l'échantillon (ml) ;

T : titre de thiosulfate de sodium (mol/l) ;

PE : prise d'essai (ml).

A partir de cette solution de nitrites, on prépare une solution fille à 1mg/l de NO_2^-

➤ solutions étalons :

Prendre successivement : 1, 2, 4, 6, 8, 10 ml de la solution à 1 mg/l de NO_2^- et compléter par l'eau distillée à 50 ml. On obtient alors des solutions étalons contenant respectivement : 0,02;0,04; 0,08; 0,12; 0,16 et 0,20 mg/l de NO_2^- (Photo III -10).



Photo III-10 : Les solutions étalons des nitrites.

✚ Mode opératoire

On réalise le mélange en introduisant 50 ml de prise d'essai, avec 1 ml de solution d'E,D,T,A et 1 ml d'acide sulfanilique, ensuite on agite et on attend 10 minutes, puis on ajoute 1 ml d' α -Naphtylamine, 1 ml de la solution de tampon acétate. Encore une fois on agite et on attend 30 minutes, enfin on effectue la mesure colorimétrique à 520 nm (Rodier et al, 2009).

✚ Expression des résultats

Après le traçage de la courbe d'étalonnage on lit directement les teneurs en azote nitreux des échantillons exprimé en mg/l.

III.5.1.7 Dosage de l'ammonium

L'ammonium, en milieu alcalin et en présence d'hypochlorite de sodium donne avec le phénol une coloration bleue d'indophénol susceptible d'un dosage colorimétrique. On utilise du nitroprussiate de sodium comme catalyseur (Rodier et al, 2009).

✚ Réactifs

- Solution mère d'ammonium 1 g/l (NH_4^+):

Peser 2,972 g de chlorure d'ammonium NH_4Cl préalablement séché et refroidi au dessiccateur. Dissoudre cette quantité dans de l'eau distillée et compléter à 1000 ml.

- Solution d'ammonium 10 mg/l (NH_4^+):

Prendre 2 ml de la solution mère à 1 g/l et compléter à 200 ml par de l'eau distillée.

- Solution d'hypochlorite de sodium à 2° chlorométrique.
- Solution étalon :

Prendre successivement : 0,25 ; 0,5 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 ; 7 et 10 ml de la solution à 10 mg/l et compléter à 50 ml par de l'eau distillée, On obtient alors des solutions étalons contenant respectivement : 0,05 ; 0,1 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 et 2 mg/l de (NH_4^+) .

- Mélange des réactifs :

On mélange les 3 premiers réactifs dans les proportions suivantes :

- 200 ml de la solution tampon et complexante ;
- 25 ml de la solution de phénate de sodium ;
- 10 ml de la solution de nitroprussiate de sodium.

Mode opératoire

La mesure colorimétrique s'effectue en opérant le mélange suivant : 20 ml PE, 2 ml du réactif mélangé, 0,5 ml d'hypochlorite à 2 °Cl (Photo III- 11).

La coloration bleue se développe à partir du moment où on les laisse les flacons à l'obscurité pendant une heure et demie, La coloration reste stable plusieurs heures. Ensuite on effectue la mesure colorimétrique à 625 nm (Rodier et al, 2009).



Photo III-11 : Dosage de l'ammonium.

Expression des résultats

La courbe donne directement la teneur en azote ammoniacal des échantillons exprimés en mg/l.

III.5.1.8 Dosage de l'orthophosphates PO_4^{3-}

En milieu acide et en présence du molybdate d'ammonium $MO_7(NH_4)_4H_2O$, les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui est réduit par l'acide ascorbique, et développe une coloration bleue pouvant être dosée colorimétriquement à une longueur d'onde de 710 ou 800 nm (Rodier et al, 2009).

Réactifs

- Solution d'acide ascorbique à 10 g/l ;
- Solution de molybdate d'ammonium ;
- Solution mère de l'orthophosphate (PO_4^{3-}) à 1g/l ;

Dissoudre 143,2 mg de phosphate dihydrogénopotassique (KH_2PO_4) (desséché au préalable à l'étuve à 100°C) dans 1000 ml d'eau distillée.

- Solution de (PO_4^{3-}) à 10 mg/l :

Placer dans une fiole jaugée de 200 ml, 2 ml de la solution mère et compléter ensuite par de l'eau distillée jusqu'à atteindre le trait de jauge.

- Solutions étalons :

Prendre successivement les volumes de : 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10 ; 15 et 20 ml de la solution à 10 mg/l, puis compléter à 50 ml avec de l'eau distillée, On obtient donc des solutions étalons contenant respectivement les concentrations suivantes : 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 et 4 mg/l.

Mode opératoire

Dans des tubes à essai on introduit 20 ml prise d'essai, puis on ajoute 5 ml des réactifs mélangés (3 volumes de la solution molybdique, 1 volume de la solution de l'acide ascorbique) (Photo III- 12).



Photo III-12 : Dosage des phosphates.

On les met à l'étuve durant 20 minutes à 80 °C et on les laisse refroidir puis on mesure l'absorption à une longueur d'onde de 825 nm (Photo III -13) (Rodier et al, 2009).



Photo III-13 : UV-Visible pour mesurer la densité optique.

✚ Expression des résultats:

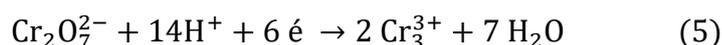
La courbe donne directement la teneur en orthophosphate des échantillons exprimée en mg/l.

III.5.1.9 Demande chimique en oxygène (DCO)

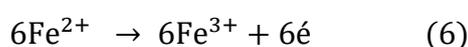
La DCO permet de déterminer la teneur totale en matières organiques oxydables des eaux, la détermination de la *DCO* s'effectue en deux étapes:

- Une oxydation de la matière organique réductrice contenue dans l'eau, par un excès de dichromate de potassium, ($K_2Cr_2O_7$), Cette oxydation se réalise en milieu acide (H_2SO_4), en présence de sulfate d'argent comme catalyseur (Ag_2SO_4) et de sulfate de mercure ($HgSO_4$) pour limiter l'interférence des chlorures, le mélange est porté à l'ébullition ($150^\circ C$) à reflux pendant 2 h,

Le dichromate de potassium est réduit comme suite :



- L'excès dichromate de potassium est dosé par une solution titrée de sulfate de fer (II) et d'ammonium (donc de Fe_2^+), en présence de ferroïne comme indicateur.



La réaction globale du dosage est la suivante :



Réactifs

- solution d'acide sulfurique à 4 mol/l ;
- solution de sulfate d'argent à 10 g/l ;
- Solution de sulfate de Fer et d'ammonium à 0,12 mol/l ;
- solution de ferroïne ;
- solution étalon de dichromate de potassium à 0,04 mol/l, contenant du sulfate de mercure (II) ;
- Vérification du titre de la solution de sulfate de Fer et d'ammonium.

Dans un erlenmeyer, on met 5 ml de bichromate de potassium à 0,04 mol/l ; on ajoute environ 100 ml avec la solution d'acide sulfurique H_2SO_4 à 4 mol/l ; enfin, on ajoute quelque goutte d'indicateur ferroïne, On remplit la burette avec le sulfate de fer et d'ammonium $(NH_4)_2Fe(SO_4)_6 \cdot 6H_2O$;(0,12 mol/l), On titre jusqu'à la coloration devient rouge (Figure III-15) (Rodier et al, 2009).

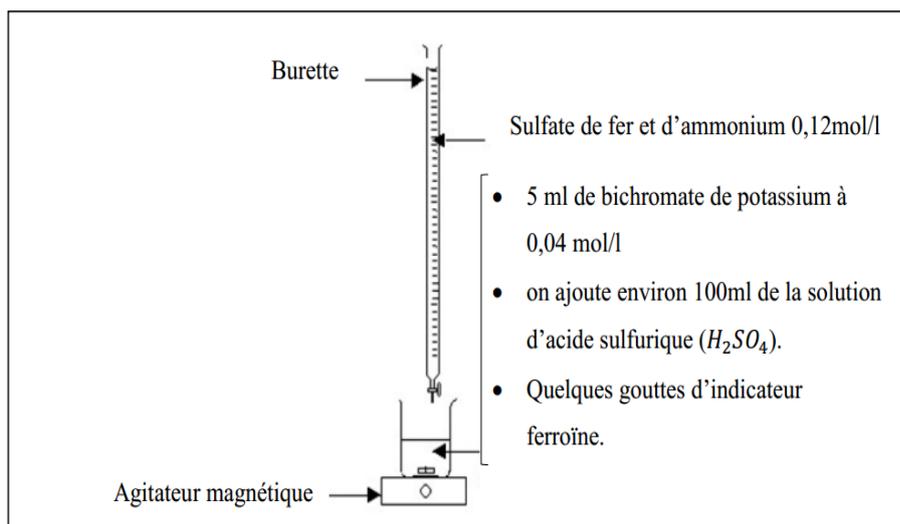


Figure III:2 : Vérification du titre de la solution de sulfate de fer et d'ammonium.

La concentration (en mol/l) de la solution sulfate de Fer et d'ammonium est donnée par la formule ci-dessous ou les volumes exprimés en ml :

$$C_{\text{mol/l}} = \frac{V_{\text{dichromate}} \times 0,04}{V_{\text{sulfate de fer}}} \times 6 = \frac{1,2}{V_{\text{sulfate de fer}}} \quad (8)$$

Avec :

C : La concentration du sulfate de fer et d'ammonium (mol/l) ;

$V_{\text{sulfate de fer}}$: Le volume de sulfate de fer nécessaire au dosage (ml) $V_{\text{dichromate}}$: Volume de dichromate de potassium (ml).

✚ Mode opératoire

Dans une série des tubes on introduit 10 ml (témoin , d'échantillon), 5 ml dichromate $K_2 Cr_2 O_7$ (0,04 mol/l) et on ajoute quelques billes régulatrices d'ébullition, 15 ml d'acide sulfurique contenant le sulfate d'argent puis on agite soigneusement les tubes, On met une ou deux gouttes d'acide sulfurique sur le col rodé, Le mélange est porté à l'ébullition pendant deux heures(Photo III -14) (Rodier et al., 2009).



Photo III-14 : Echauffement du mélange (échantillon + réactif).

On retire les tubes et on les laisse refroidir. Après (2 h) on transvase le tout dans un erlenmeyer de 250 ml, et on rince avec environ 75 ml d'eau. On titre l'excès de bichromate de potassium avec la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium en présence d'une ou deux gouttes de ferroïne jusqu'à la coloration rouge brique (Photo III- 15) (Rodier et al., 2009).



Photo III-15 : Titrage de l'excès de dichromate de potassium.

✚ Expression des résultats

La demande chimique en oxygène (DCO) exprimée en milligrammes d'oxygène par litre est égale à :

$$\text{DCO en } \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ d'O}_2 = \frac{8000 \times (V_0 - V_1) \times T}{\text{PE}} = 800 \times (V_0 - V_1) \times T \quad (9)$$

Avec :

V_0 = Volume de sulfate de fer et d'ammonium (II) nécessaire au dosage (ml),

V_1 = Volume de sulfate de fer et d'ammonium (II) nécessaire à l'essai à blanc (ml),

T = Titre de la solution de sulfate de fer et d'ammonium,

P, E = Volume de la prise d'essai (ml).

III.5.1.10 Demande biochimique en oxygène DBO_5

Le principe de mesure de la demande biochimique en oxygène consiste à déterminer la quantité d'oxygène consommée au bout de cinq jours d'incubation, dans les conditions d'essai, à 20 °C dans une solution diluée de l'échantillon (Rodier et al, 2009).

Mode opératoire:

On remplit les flacons avec les échantillons d'eau (usée et épurée) déterminé du tableau III.1 après la mesure de la DCO selon la formule :

$$DBO_5 = 0,8 \times DCO \quad (10)$$

On met un barreau magnétique dans chacun des flacons pour l'homogénéisation, On rajoute les pastilles d'hydroxyde de sodium pour piéger le CO_2 dégagé par l'oxydation de la matière organique.

Les échantillons sont placés dans une chambre thermostatée et sombre durant la mesure de DBO_5 On règle l'appareil à ZERO et on met l'incubateur en marche pendant 5 jours à 20°C, Le résultat est obtenu directement sur l'afficheur (Photo III -16) (Rodier et al., 2009).



Photo III-16 : Incubation des flacons.

Tableau III-1 :Facteur de conversion de la DBO₅ en fonction de volume de prise.

La charge	DBO ₅ présumée (mg/l)	Prise d'essai (ml)	Facteur
Très faible	0 – 40	432	1
Faible	0 – 80	365	2
Moyenne	0 – 200	250	5
Plus que la moyenne	0 – 400	164	10
Un peu chargée	0 – 800	97	20
Chargé	0 – 2000	43,5	50
Très chargé	0 – 4000	22,7	100

Expression des résultats :

La valeur de la DBO₅ est calculée selon l'expression suivante :

$$DBO_5 \text{ en mg/l } d'O_2 = \text{lecture} \times \text{facteur} \quad (11)$$

III.6 Conclusion

L'analyse des résultats des essais effectués au laboratoire a permis de choisir 5 lit filtrations, Des diamètres 125 um, 200 um, 250 um, 400 um, 500 um, chacune est caractérisée des analyses avant et après la filtration.

IV.1 Introduction

Après avoir présenté les outils méthodologiques nécessaires pour la réalisation de ce travail, dans ce chapitre nous procéderons à l'interprétation et à la discussion des résultats obtenus. A travers ces résultats, nous essayerons de déterminer l'influence de la granulométrie de sable sur le traitement des eaux usées en comparant ces résultats avec les normes des rejets. Après la réalisation du traitement des eaux usées industrielles par les différents filtres nous avons procédé aux analyses des eaux brutes et filtrées, et les résultats ainsi obtenus sont donnés et interprétés dans ce qui suit.

IV.1.1 Analyse granulométriques

Le tableau suivant (Tableau IV-1) regroupe les résultats de l'opération du tamisage et de l'analyse granulométrique.

Tableau IV-1 L'analyse granulométrique du sable.

Ouverture des tamis (μm)	Masse des refus mi (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés $\text{Pr} = \frac{\text{Mc}}{\text{M}} \times 100$ (%)	Pourcentage des tamis cumulés $\text{Pt} = (100 - \text{Pr})$ (%)
630	1	0,10	0,10	99,89
500	45	4,53	4,63	95,37
400	122,47	12,33	16,96	83,04
250	621,89	62,59	79,54	20,45
200	15,28	1,54	81,08	18,92
125	163,77	16,48	97,57	2,44
80	20,92	2,10	99,67	0,33

D'après les résultats du tableau (IV-1) on constate que la granulométrie la plus dominante est 630 et 500 μm avec un pourcentage de 99 et 95 % respectivement et la granulométrie la moindre représentée est de 80 μm avec un taux de 0,33%.

IV.1.2 Caractéristique des eaux usées industrielles

Tableau IV-2 les résultats des analyses de l'eau brute.

Paramètre	Valeur	Unité
PH	7,9	
La conductivité	166,84	mS/cm
MES	643	mg/l
La turbidité	783	NTU
La DCO	139,52	mg/l d'O ₂
La DBO ₅	85	mg/l d'O ₂
Nitrate	20,67	mg/l
Nitrite	0,42	mg/l
Ammonium	7,12	mg/l
Ortho phosphate	0,82	mg/l

A la lumière de ces résultats obtenus il apparaît que l'eau est moyennement polluée où la teneur de MES était de 643 mg/l la charge organique a été mise en évidence par la DCO et DBO₅ où nous avons enregistré des concentrations 139 et 85 mg/l d'O₂ respectivement. La forme d'azote la plus dominante était les nitrates avec un taux de 20 mg/l.

IV.1.3 Variation du potentiel Hydrogène (pH)

Les résultats des pH des eaux analysées avant et après la filtration sur les différents filtres sont donnés dans le (Tableau A-1) en annexe. À partir de ces résultats on peut constater que le pH des eaux après filtration varie entre 7,34 et 8,06. On constate également que pour les filtres 200 µm et 125 µm, il y a une augmentation du pH à cause de la dissolution des carbonates et des bicarbonates avec un temps de contact important de la filtration.

La figure suivante (Figure IV-1) montre la comparaison des valeurs du pH des eaux filtrées par rapport à l'eau brute. On remarque une légère augmentation par rapport au brute et la totalité des valeurs sont conformes aux normes algériennes et internationales des rejets ($6,5 < \text{pH} > 8,5$). Ces résultats sont en bon accord avec les travaux réalisés par (Yousfat et Mahmoudi, 2016) qui ont trouvés une augmentation du pH, pendant leurs travaux de recherche sur la filtration sur sable.

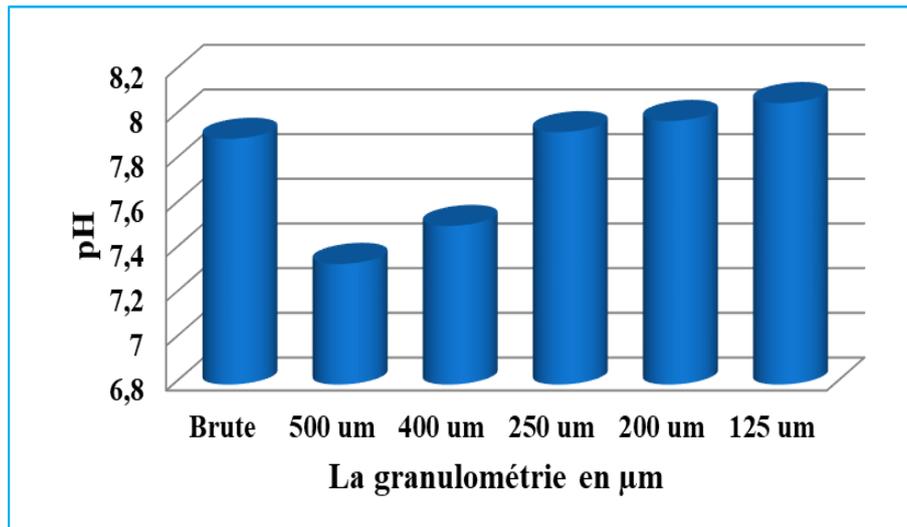


Figure IV:1 Variation du pH avant et après filtration

IV.1.4 Variation de la conductivité

Les résultats des analyses de l'eau brute et filtrées montrent que ces eaux possèdent des conductivités très élevées à cause des additifs lors du traitement du pétrole. A partir du (Tableau A-2), on constate aussi que ces valeurs varient entre 166,84 mS/cm et 135,28 mS/cm.

L'évolution de la conductivité des eaux analysées avant et après filtration est représentée par la (Fig. IV-2). On constate de cette figure une légère diminution de la conductivité des eaux filtrées, quoiqu'elle reste toujours élevée.

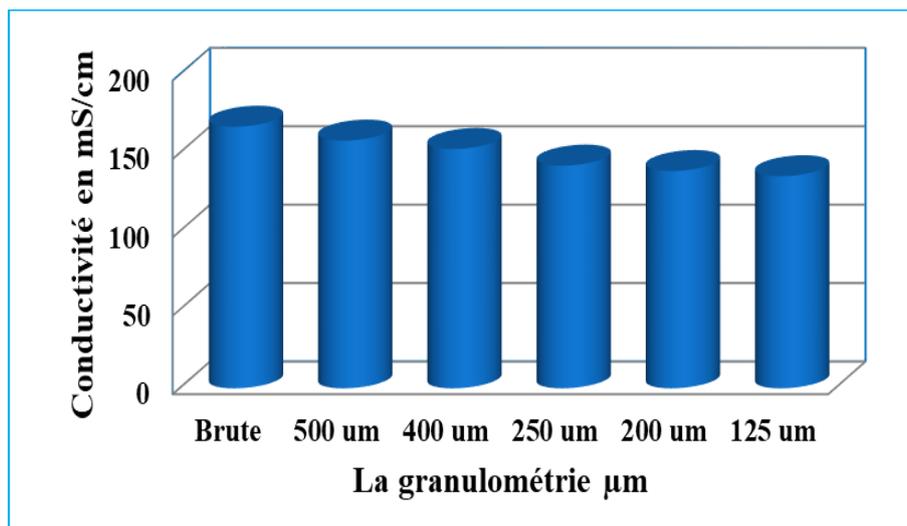


Figure IV:2 Variation de la conductivité électrique avant et après filtration

La (Fig. IV-3), présente le rendement d'abattement de la conductivité en fonction de la granulométrie. On remarque de celle-ci qu'il existe une faible réduction des ions minéraux par la filtration, le rendement ne dépasse pas 20 %.

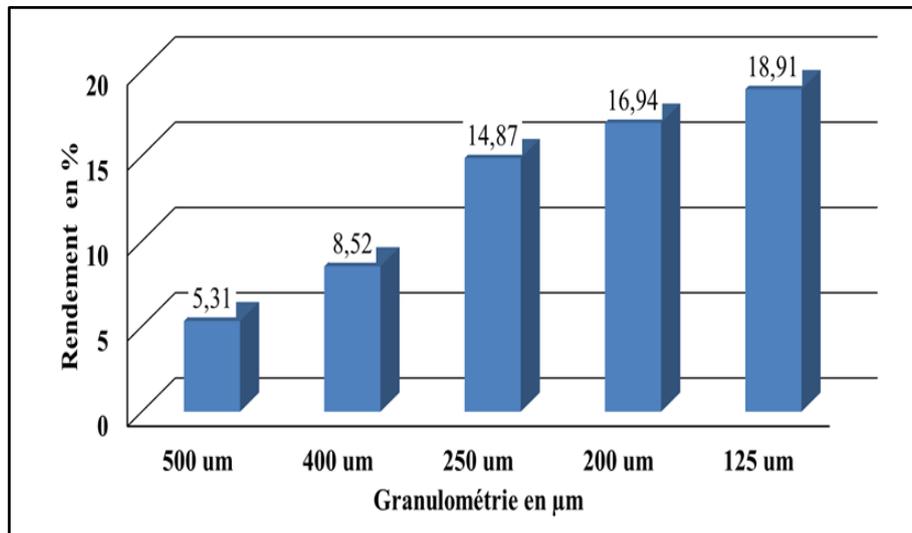


Figure IV:3 Rendement d'abaissement de la conductivité

IV.1.5 Variation de la matière en suspension (MES)

Les résultats de la matière en suspension MES sont illustrés dans le (Tableau A-3). On constate de ces résultats que la MES varie entre 100 et 216 mg/l pour les eaux traitées. Quant à l'eau brute la valeur trouvée est de l'ordre de 643 mg/l.

La représentation graphique de la matière en suspension en fonction de la granulométrie est donnée par la (Figure IV-4). Cette figure montre bien qu'il existe une grande réduction de la MES par la filtration, on remarque aussi que la diminution de la taille des grains améliore bien l'efficacité des filtres.

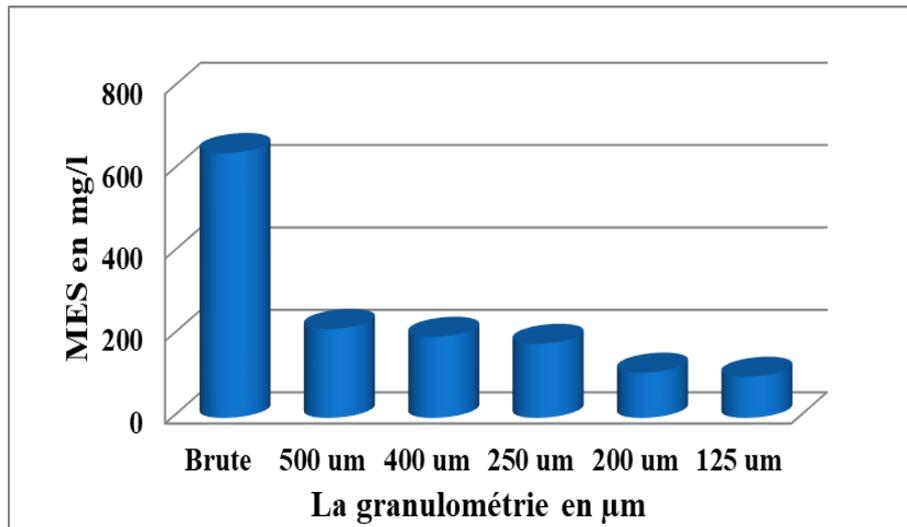


Figure IV:4 Variation des teneurs en MES avant et après la filtration

La représentation graphique du rendement d'abattement est donnée par la figure suivante (Figure IV-5). Cette figure indique que la diminution de la taille de grain augmente le taux de la MES, et le meilleur résultat (85 %) est observé avec la taille 125 µm. Ces résultats sont en bonne accord avec ceux obtenus par (Yousfat et Mahmoudi, 2016).

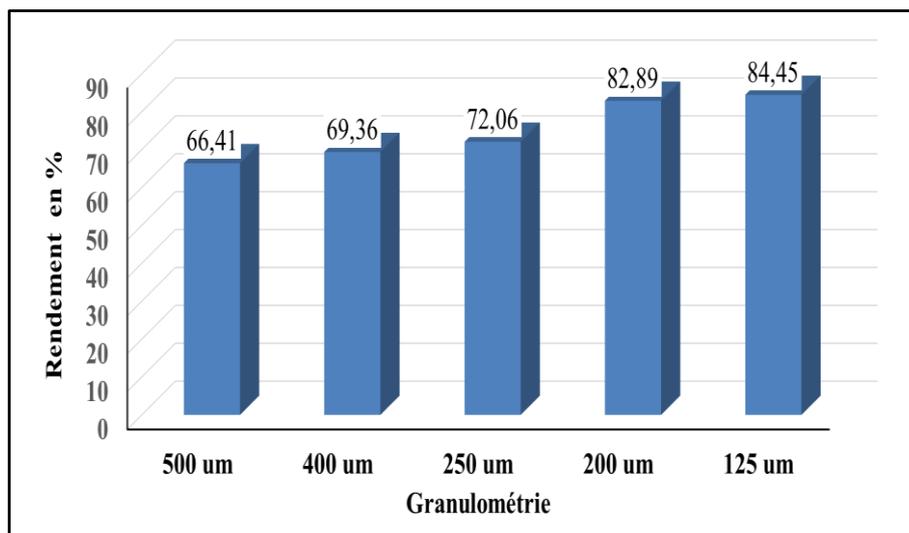


Figure IV:5 Rendement d'élimination de MES

IV.1.6 La variation de la turbidité

Les résultats des analyses de la turbidité des eaux avant et après filtration sont présentés dans le (Tableau A-4). A l'issue de ces résultats on note que la turbidité de l'eau brute est de l'ordre de 783 NTU, par contre celles des eaux filtrées varient entre 19 et 429 NTU.

La variation de la turbidité des eaux filtrées en fonction de la taille des grains de sable est présentée par la figure suivante (Fig. IV-6). On constate que la réduction de la taille des grains a un effet considérable sur l'élimination de la turbidité de l'eau et les meilleurs valeurs ont été enregistrées avec 200 μm et 125 μm .

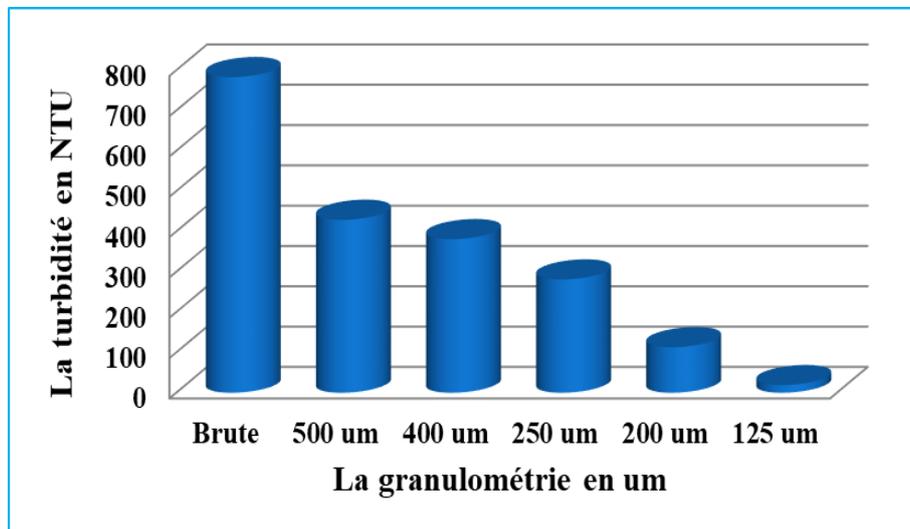


Figure IV:6 Variation de la turbidité avant et après la filtration

À travers la figure qui présente l'évolution des rendements en fonction de la granulométrie on constate que pour tous les filtres on a enregistré des rendements importants, également une réduction de plus de 60 % jusqu'à 97 % a été obtenue avec des tailles inférieures à 250 μm .

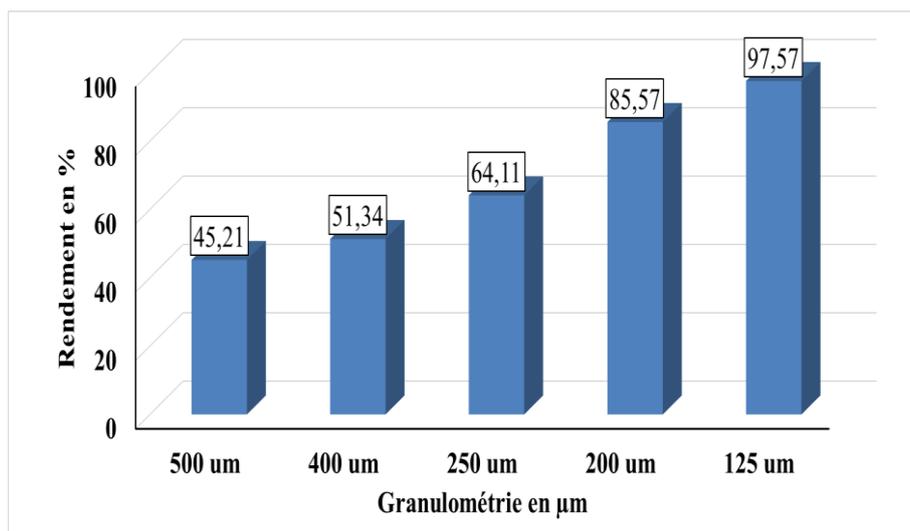


Figure IV:7 Rendement d'abaissement de turbidité

IV.1.7 Demande chimique en oxygène (DCO)

Les valeurs de la DCO sont exposées dans le tableau suivant (Tableau A-5). Ces résultats montrent que la DCO est comprise entre 104,64 et 113,56 mg/l d'O₂, pour les eaux filtrées. On ce qui concerne le brute la DCO est de 139,52 mg/l d'O₂.

L'évolution de la DCO en fonction de la granulométrie est illustrée par le (Fig. IV-8), cette figure indique une stabilité de réduction de la DCO à partir du filtre de taille de 250 µm.

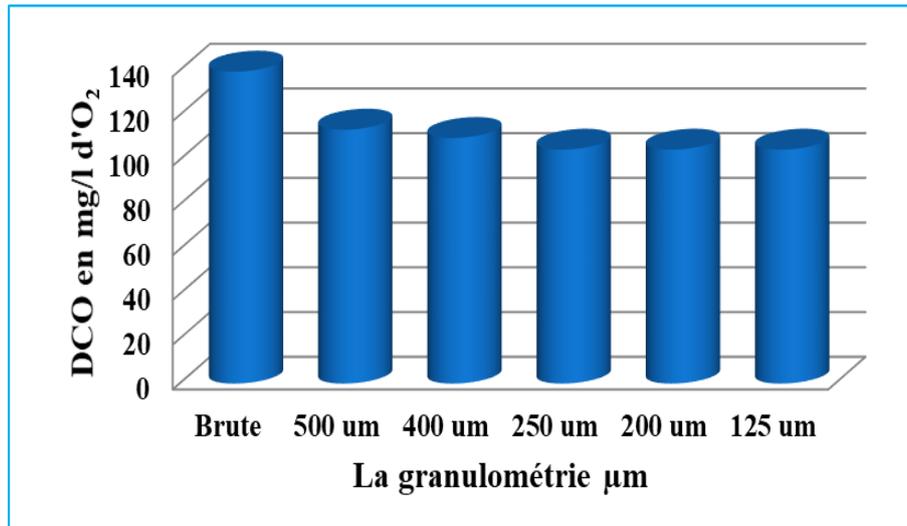


Figure IV:8 Variation des valeurs de la DCO avant et après la filtration

Afin d'évaluer l'efficacité de la technique utilisée, nous avons calculé le rendement épuratoire de l'élimination de la DCO et de la DBO₅ avec les relations suivantes :

$$R_{DCO} \text{ en } (\%) = (DCO_{eb} - DCO_{ef}) \times 100 / DCO_{eb} \quad (12)$$

Avec :

DCO_{eb} : la valeur de DCO en eau brute ;

DCO_{ef} : la valeur de DCO en eau filtré.

Ensuite, on trace la courbe d'évolution de ces rendements en fonction de la granulométrie. A partir des résultats obtenus on observe une augmentation des rendements de la DCO pour chaque filtre jusqu'à une valeur maximale de 25 % avec le filtre de 250 µm puis il se stabilise.

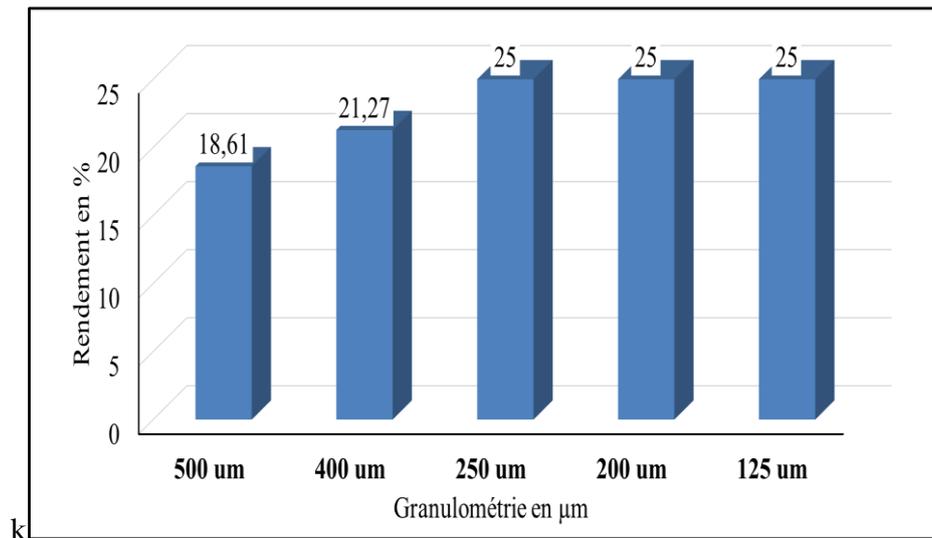


Figure IV:9 Evolution des rendements d'élimination de la DCO

IV.1.8 La variation de la demande biochimique en oxygène (DBO₅)

Les valeurs de la DBO₅ sont présentées dans le (Tableau A-5). Il découle de ce tableau que les valeurs de DBO₅ après traitement varient entre 80 et 35 mg/l d'O₂, tandis que celle du brute est de l'ordre de 85 mg/l d'O₂.

La variation de DBO₅ en fonction des tailles des grains est donnée par la figure suivante (Fig. IV-10), de celle-ci on peut dire qu'il existe une bonne évolution de la DBO₅, cela est dû probablement au temps de filtration avec des filtres à faible taille qui favorise la biodégradabilité de la matière organique.

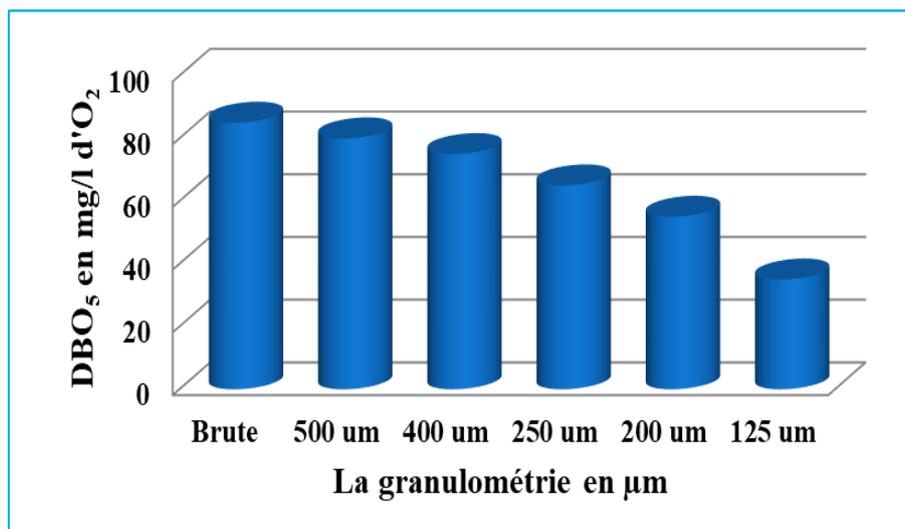


Figure IV:10 Variation des valeurs de la DBO₅ avant et après la filtration

Pour tracer la courbe de la variation des rendements épuratoires on procède au calcul en appliquant la formule suivante :

$$R_{\text{DBO}} \text{ en } (\%) = (\text{DBO}_{\text{eb}} - \text{DBO}_{\text{ef}}) \times 100 / \text{DBO}_{\text{eb}} \quad (13)$$

Avec :

DBO_{eb} : la valeur de DBO en eau brute ;

DBO_{ef} : la valeur de DBO en eau filtré.

Les résultats obtenus sont données par la figure suivante (Fig. IV-11). A partir de ces résultats on constate que le rendement maximum (59 %) est obtenu avec la taille de 125 μm , également la taille 200 μm a donné un rendement acceptable de (35,29 %). Nos résultats sont très proches a ceux trouvés les mêmes auteurs cité dans le paragraphe précédent (60%).

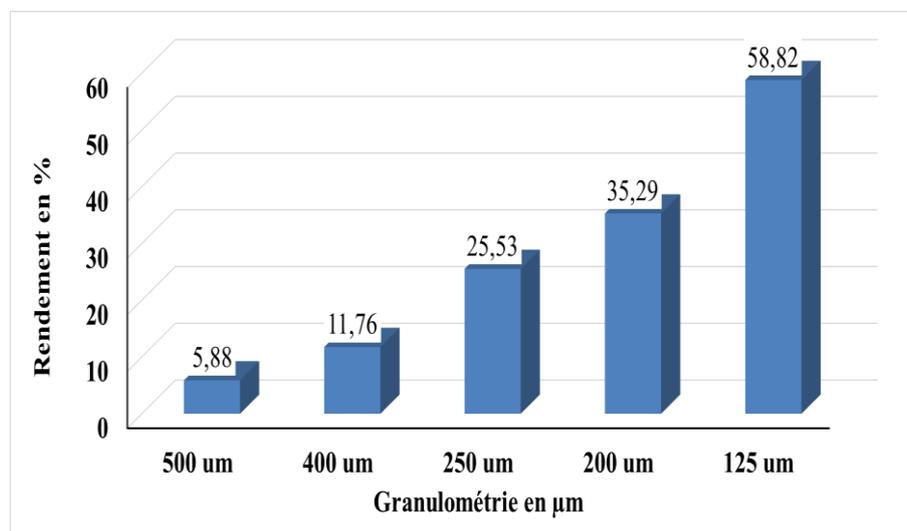


Figure IV:11 Evolution des rendements d'abattelements de la DBO_5

IV.1.9 La variation de l'ammonium NH_4^+

Le tableau suivant (Tableau A-7), montre l'évolution des teneurs en ammonium des eaux brutes et filtré. Selon ces résultats, on remarque que les concentrations de l'azote ammoniacal pour l'eau brute est de 7,12 mg/l, tandis que pour l'eau filtré est comprise entre 6,4 et 13,32 mg/l, la valeur la plus faible a été observée avec le filtre de 500 μm .

A travers la représentation graphique donnée par la (Fig. IV-12), on constate que les concentrations sont relativement forte avant et après la filtration et dépassent 0,5 mg/l (normes internationales de rejet) On peut expliquer cette augmentation par la décomposition de l'azote organique au moment de l'opération de filtration.

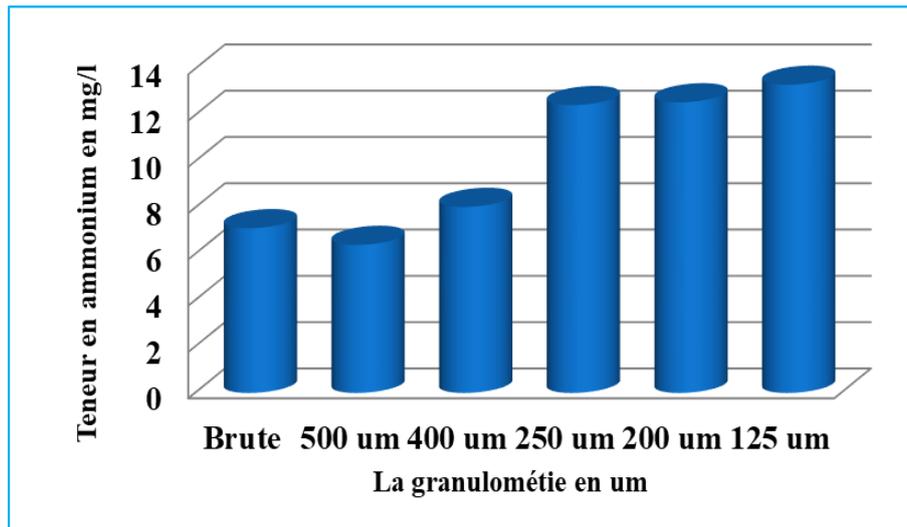


Figure IV:12 Variation des teneurs en ammonium des eaux brutes et eaux filtré.

IV.1.10 La variation de nitrite NO_2^-

Le (Tableau A-8) montre les concentrations de nitrite obtenu avant et après la filtration. Il découle de ce tableau que la teneur en nitrite pour l'eau brute est de 0,42 mg/l, par contre pour les eaux filtrées varient entre 0,11 et 0,14 mg/l.

L'évolution des nitrites en fonction de la granulométrie est donnée par la figure qui suit (FigureIV-13), on remarque de celle-ci une perturbation dans l'élimination de ces dernières, ce qui est du à la transformation des nitrites en nitrates.

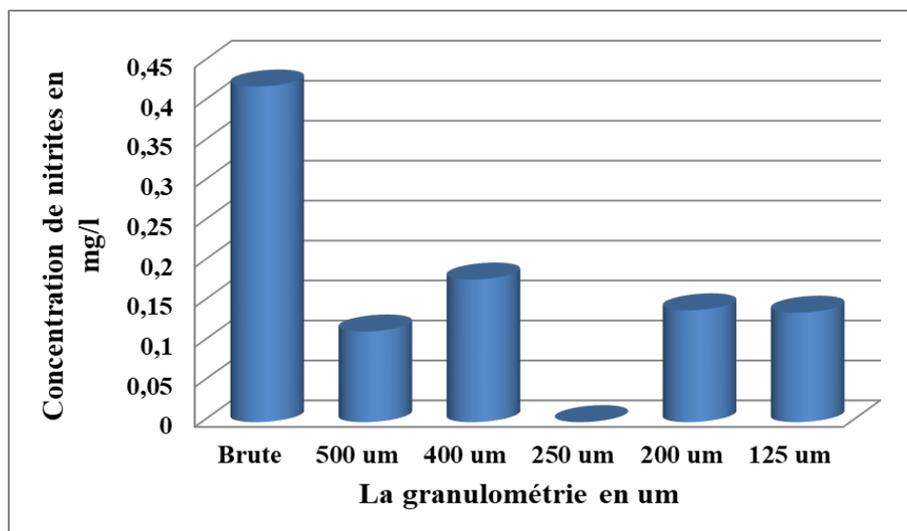


Figure IV:13 Variation des concentrations des nitrites avant et après la filtration

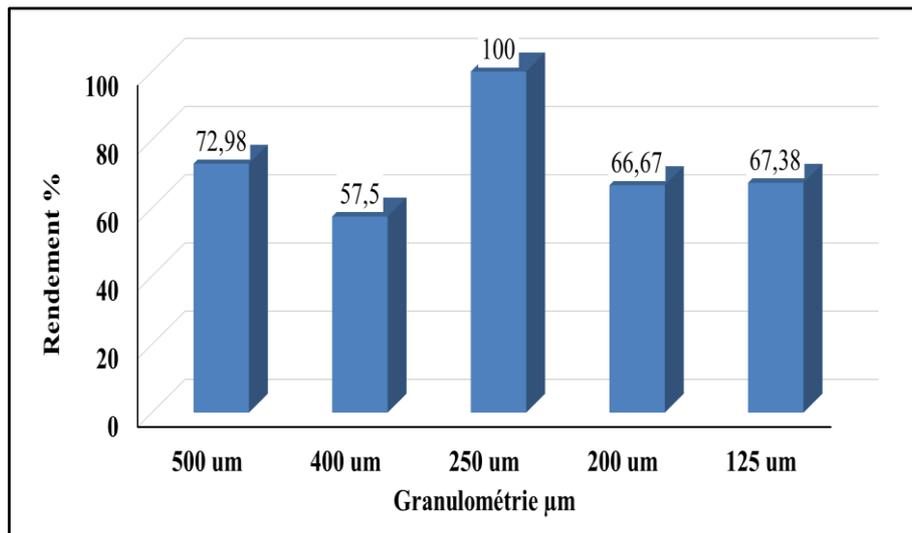


Figure IV:14 Rendement d'élimination de nitrite

IV.1.11 La variation de nitrate NO_3^-

Les teneurs en nitrate sont données dans le tableau ci-dessous. Nous observons d'après le (Tableau A-9), que la teneur en nitrate pour l'eau brute est de 20,67 mg/l, les eaux filtrées ont des teneurs comprises entre 18,22 et 5,51 mg/l, la faible teneur est remarquée avec le filtre de 125 µm.

La variation des nitrates des eaux brute et filtrées est donnée par la (Figure IV-15), on constate qu'il existe une régression de cette teneur en fonction de la granulométrie, et la valeur la plus faible est obtenue avec 125 µm.

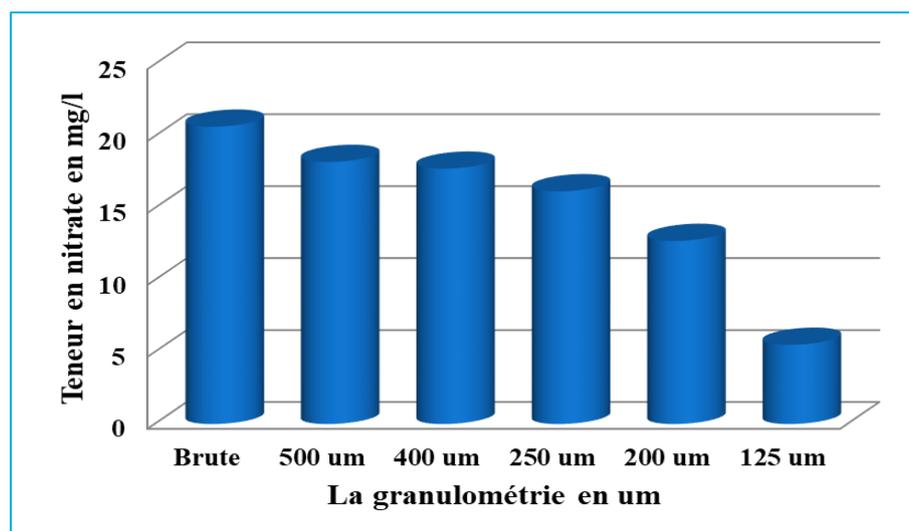


Figure IV:15 Variation des teneurs en nitrate avant et après la filtration

La représentation graphique des rendements d'abattement des nitrates est donnée par la (Fig. IV-16), elle découle de celle-ci que les filtres de taille 200 et 125 μm présentent les bons rendements d'éliminations des nitrates.

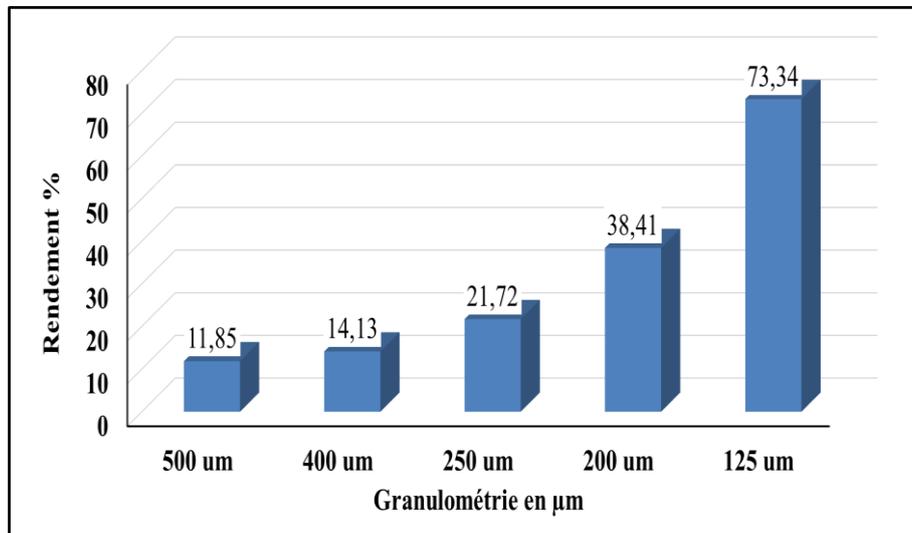


Figure IV:16 Rendements d'élimination des nitrates

IV.1.12 La variation de l'ortho phosphate PO_4^{-3}

Les résultats obtenus des concentrations d'ortho phosphate pour les eaux brutes et filtré sont données dans le tableau suivant (Tableau A-10). Ces résultats montrent que les teneurs en phosphates ont été totalement éliminées par tous les filtres.

La variation des phosphates avec la granulométrie est donnée par la figure suivante (Fig. IV-17), il découle de ces cette figure que les phosphates ont été éliminés totalement avec tous les filtres.

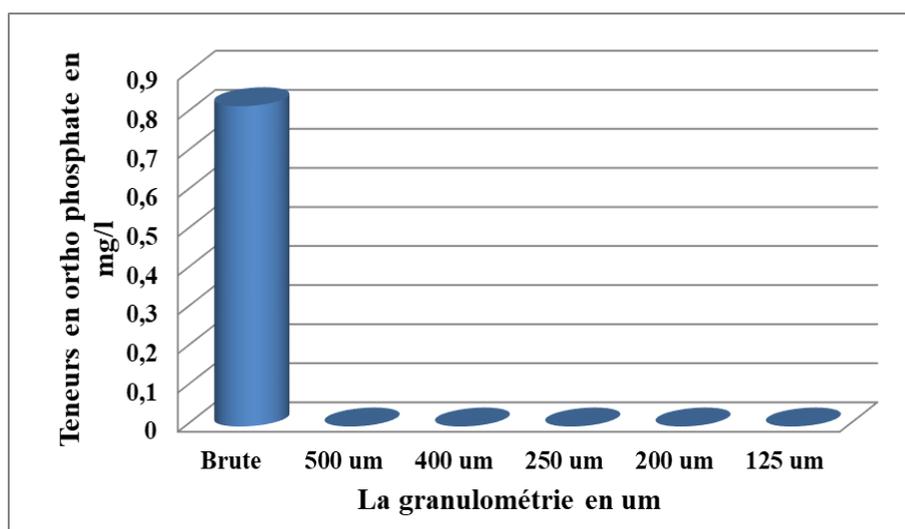


Figure IV:17 Evolution des phosphates avec la granulométrie

IV.1.13 Comparaison des résultats avec les études précédentes

Le tableau suivant présente une comparaison des taux d'abattement entre une étude réalisée par (Yousfat et Mahmoudi, 2016) sur l'effet de la hauteur de la colonne de sable sur le traitement des eaux usées et nos résultats.

Tableau IV-3 Comparaison des résultats obtenus avec d'autres études

Paramètres	Résultats 2016	Résultats 2019
MES	95%	85 %
Nitrites	12,63%	67,38%
L'ammonium	96%	-
Les phosphates	97,74%	100%
DCO	66,66%	25%
DBO ₅	59,17%	58,82%

A l'issue de ces résultats on peut dire que nos résultats sont très proche et parfois meilleurs par rapport aux résultats précédents.

IV.2 Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer l'influence de la granulométrie des filtres de sable sur les paramètres physicochimiques des eaux usées, l'ensemble des résultats montre que le filtre 125 μm plus efficace par rapport aux autres filtre (500 μm -200 μm).

Conclusion générale

La filtration sur sable est généralement l'étape finale du traitement de clarification. C'est une opération qui permet de retenir les dernières particules solides en suspensions échappées des traitements de coagulation-floculation et puis décantation. Dans ce modeste travail on a effectué une filtration sans ces traitements précités. Notre travail s'intéresse à l'étude de l'influence de la granulométrie du sable sur le traitement des eaux usées industrielles.

Les résultats obtenus permettent de distinguer une différence entre les valeurs de pollution des eaux brutes et celles des eaux filtrées, l'eau brute est caractérisée par ; un pH de l'ordre de (7,9) neutre, une conductivité électrique élevée, une MES et une turbidité très chargées, une DCO et une DBO₅ de 139,52 et 85 mg/l d'O₂, respectivement et des paramètres de pollution : l'ammonium, nitrite, nitrate et l'ortho phosphate sont 7,12 mg/l, 0,42 mg/l, 20,67 mg/l, et 0,82 mg/l, respectivement.

En revanche, nous avons enregistré des taux d'éliminations de 84,45 %, et 97,57 % pour les matières en suspension (MES) et la turbidité respectivement par le filtre de diamètre 125 µm, et 25 % pour la Demande Chimique en Oxygène (DCO) par le filtre de diamètre 250 µm, puis reste stable. Ainsi qu'un abattement de 58,82 % pour la Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅) par le filtre de diamètre 125 µm, et pour les dérivées azotées, on remarque une augmentation de l'ammonium à cause de la décomposition de l'azote organique, une perturbation dans l'élimination de nitrite 100 % par le filtre de diamètre 250 µm, et un taux de 73,34 % pour le nitrate par le filtre de diamètre de 125 µm. Quant à l'ortho phosphates l'élimination été totalement avec tous les filtres.

On a conclu également de ces résultats que le filtre de diamètre 125 µm donne des meilleurs résultats. Et par conséquent la granulométrie a un effet considérable sur l'amélioration de l'efficacité du traitement.

Références Bibliographiques

- Abibsi, N., 2011. Réutilisation des eaux usées épurées par filtres plantes (phytoepuration) pour l'irrigation des espaces verts application à un quartier de la ville de Biskra (Thèse doctorat). Université de Biskra, Algérie.
- Attab, S., 2011. Amélioration de la qualité microbiologique des eaux épurées par boues activées de la station d'épuration haoud-berkaoui par l'utilisation d'un filtre à sable local (Mémoire de Magister). Université Kasdi Merbah Ouargla,.
- Belghiti, M.L., Chahlaoui, A., Bengoumi, D., Moustaine, R.E., 2013. Etude de la qualité physico- chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire dans la région de Meknès (Maroc). LARHYSS J. ISSN 1112-3680.
- Bengouga, K., 2010. Contribution à l'étude du rôle de la végétation dans l'épuration des eaux usées dans les régions arides (Mémoire de Magister). Université de Biskra, Biskra.
- Berne, F., Cordnier, J., 1991. Traitement des eaux. Editions Technip, Paris.
- Boumedienne, M.E.A., 2013. Bilan de suivi des performances de fonctionnement d'une station d'épuration a boues activées: cas de la STEP Ain el houte. Tlemcen: Université Abou Bekr Belkaid (Mémoire de Licence). Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Tlemcen.
- Colomb, R., 1989. Hydraulique urbaine. Ed. Eyrolles Paris.
- Crini, G., Badot, P., 2008. Traitement et épuration des eaux industrielles polluées: Procédés membranaires, bio-adsorption et oxydation chimique. Presses Univ. Franche-Comté.
- Dégerment, S.A., 2005. Mémento technique de l'eau. Le tome 1, 2. Dégerment Suez.
- Desjardins, R., 1997. Le traitement des eaux. Presses inter Polytechnique.
- Djeddou, M., 2014. Prévion du taux d'échec avec les réseaux neurones artificiels dans une station de traitement des eaux résiduaires (Thèse doctorat). Université Mohamed Khider Biskra, Algérie.
- Ezziane, S., 2007. Traitement des eaux de projets de l'unité céramique «Tenes». (Thèse doctorat). Université de Chlef.
- Fecih, A., 2012. L'influence de la filtration sur sable sur le traitement des eaux saumâtres (Mémoire de Master). Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algerie..

- Gamrasni, M., 1981. Utilisation agricole des boues d'origine urbaine. Ministère de l'agriculture, Mission énergie.
- <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/sites/default/files/users/lraintea/Traitement%20primaire.jpg> consulté le mai 2019.
- Jerome, C., 1997. Les eaux pluviales: gestion intégrée, Sang de la terre., ed, Collection Écologie urbaine. Sang de la terre.
- Kendouci, M.A., 2017. Étude De Risque De Pollution Des Eaux Souterraines De La Ville De Béchar Et Valorisation Du Sable En Vue De Son Utilisation En Traitement Des Eaux Usées (Thèse doctorat). Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran, Oran.
- Levallois, P., Phneuf, D., 1994. La contamination de l'eau potable par les nitrates: analyse des risques à la santé. *Can. J. Public Health.* 85, 192–196.
- Maazouzi, A., 2010. Etude de procédés de filtration sur sable (Sud-Ouest Algérien): application à la production d'eau potable en filtration frontale. étude de cas sur colonne à l'échelle laboratoire (Thèse doctorat). Ecole Nationale Polytechnique.
- Mahdjar, M. 2016. Etude des performances de la station d'épuration de la ville d'Ouargla (Mémoire de Master). Université Kasdi Merbah d'Ouargla, Algérie.
- Melquiot, P., 2003. 1.001 mots et abréviations de l'environnement et du développement durable. Librairie Environnement.
- Musy, A., Higy, C., 2004. Hydrologie: Une science de la nature. PPUR presses polytechniques.
- Nedjah, N., 2016. Déphosphatation physico-chimique et biologique des eaux usées (Thèse doctorat). Université Badji Mokhtar d'Annaba, Algérie.
- Ouali, M.-S., 2001. Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux, OPU. ed. Algérie.
- Patrick, B., 2009. Panorama des techniques de traitement des déchets d'assainissement, Rapport, FNSA
- Rakotomaria, E., Ratsimba, M., Rakotomamojy, P., 2011. Valorisation chimique du kaolin dans le traitement des eaux: préparation de nouveaux coagulants minéraux. *Rev. Sci. L'eau Journal Water Sci.* 24, 437–448.

Références Bibliographiques

- Rejsek, F., 2002. Analyse des eaux: aspects réglementaires et techniques. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine.
- Richardson, S.D., Ternes, T.A., 2014. Water analysis: emerging contaminants and current issues. *Anal. Chem.* 86, 2813–2848. <https://doi.org/10/gfkr4h>
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., Brunet, R., 2009. L'analyse de l'eau - 9e éd.: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 9 ed. ed, Environnement. Dunod, France.
- Santé Canada, 1997. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique – le nitrate et le nitrite [WWW Document]. URL <https://www.canada.ca> (Consulté 2.20.19).
- Yousfat, F., et Hammoudi, S., 2016. Influence de la hauteur de la colonne de distillation sur la filtration des eaux usées sur sable. (Mémoire de Master). Université Ahmed Draia Adrar, Algérie.

Annexes

Tableau A. 1 Valeurs des pH des eaux avant et après filtration

Valeurs des pH		
Avant	Après	
7,9	500 µm	7,34
	400 µm	7,51
	250 µm	7,93
	200 µm	7,98
	125 µm	8,06

Tableau A. 2 Valeurs de conductivité avant et après la filtration

La conductivité en mS/cm		
Avant	Après	
166,84	500 um	157,98
	400 um	152,63
	250 um	142,03
	200 um	138,58
	125 um	135,28

Tableau A. 3 Teneurs en MES avant et après la filtration

La teneur en MES (mg/l)		
Avant	Après	
643	500 um	216
	400 um	197
	250 um	180
	200 um	110
	125 um	100

Tableau A. 4 Valeurs de la turbidité avant et après la filtration

La turbidité en NTU		
Avant	Après	
783	500 um	429
	400 um	381
	250 um	281
	200 um	113
	125 um	19

Tableau A. 5 Valeurs de la DCO avant et après la filtration

La DCO en mg/l d'O ₂		
Avant	Après	
139,52	500 um	113,56
	400 um	109,84
	250 um	104,64
	200 um	104,64
	125 um	104,64

Tableau A. 6 Valeurs de la DBO5 avant et après la filtration

La DBO5 en mg/l d'O ₂		
Avant	Après	
85	500 um	80
	400 um	75
	250 um	65
	200 um	55
	125 um	35

Tableau A. 7 Teneurs en ammonium des eaux brute et eaux filtrées

NH_4^+ en mg/l		
Avant	Après	
7,12	500 um	6,4
	400 um	8,04
	250 um	12,44
	200 um	12,56
	125 um	13,32

Tableau A. 8 Concentrations des nitrites avant et après la filtration

NO_2^- en mg/l		
Avant	Après	
0,42	500 um	0,11
	400 um	0,18
	250 um	00
	200 um	0,14
	125 um	0,14

Tableau A. 9 Teneurs en nitrate avant et après la filtration

NO_3^- en mg/l		
Avant	Après	
20,67	500 um	18,22
	400 um	17,75
	250 um	16,18
	200 um	12,73
	125 um	5,51

Tableau A. 10 Teneurs en ortho phosphate avant et après la filtration

PO₃⁻³ en mg/l		
Avant	Après	
0,82	500 um	00
	400 um	00
	250 um	00
	200 um	00
	125 um	00

Tableau A. 11 Normes Algérienne de rejet des eaux usées

Paramètre	Unité	Normes de rejet
Température	°C	30
pH	-	6,5 à 8,5
MES	mg/l	35
DBO₅	mg/l	35
DCO	mg/l	120
Azote Kjeldahl	mg/l	30
Phosphates PO₄⁻³	mg/l	02
Couleur	-	Incolore
Odeur	-	Incolore

Tableau A. 12 Normes de rejets internationales

Paramètre	Unité	Normes de rejet
pH	-	6,5 à 8,5
DBO₅	mg/l	<30
DCO	mg/l	<90
MES	mg/l	<20
NH₄⁺	mg/l	<0,5
NO₂	mg/l	1

Annexes

NO₃	mg/l	<1
Température T	°C	<30
Couleur	-	Incolore
Odeur	-	Incolore

ملخص

في هذا العمل المتواضع استخدمنا الرمل كمادة ترشيح. يكمن الاختلاف في حجم الحبيبات بهدف معرفة تأثير هذا الاختلاف على هذه الدراسة.

إن النهج المعتمد في هذه الدراسة هو إجراء تحليل لمياه الصرف الصحي الصناعي وإجراء دراسة تجريبية لتصفية هذه الأخيرة باستعمال رمل الصحراء الجزائرية.

تم التركيز في هذه الدراسة على متابعة العديد من العوامل قبل وبعد الترشيح: الأس الهيدروجيني pH ، الناقلية الكهربائية CE ، العكارة turbidité ، المواد العالقة (MES) ، الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO) ، الطلب البيوكيميائي للأكسجين (DBO₅) ، الأمونيوم (NH₄⁺) ، النترات (NO₃⁻) ، النتريت (NO₂⁻) ، أرتو فوسفات (PO₄³⁻).

حضرت في المختبر 5 عينات من الرمل بحجم حبيبات مختلفة 200 µm, 250 µm, 400 µm, 500 µm و 125 µm و بعد عملية الترشيح، أظهرت التحاليل ان الحجم الحبيبي الضعيف من الرمل قدر مردوده بنسبة 97% بالنسبة للمواد العالقة، أما فيما يخص معيار الطلب الكيميائي و البيولوجي للأكسجين في خمسة أيام فقد قدر مردودهما ب25% و 59% على التوالي. بالمقابل أظهرت النتائج تذبذب في تركيز الملوثات الأزوتية في المياه المصفاة.

من خلال نتائج هذا البحث اظهرت ان الرمل ذو الحجم الضعيف مرشح جيد في معالجة مياه الصرف الصحي.

الكلمات المفتاحية: حجم الحبيبات، الرمل، الترشيح، مياه الصرف الصحي الصناعية، الخصائص الفيزيوكيميائية.

Abstract

In this modest work we have used sand as a filter bed. The difference lies in the size of the granules. The goal is to see the influence of this difference on this process.

The approach adopted during this process is to carry out a physicochemical analysis of industrial waste water and to carry out an experimental study of filtration at the laboratory scale and to follow the evolution of the physicochemical parameters characterizing the water to be purified before and after filtration. Using the sand of the Algerian desert.

Physico-chemical analyzes were performed on ten parameters: pH, electrical conductivity, turbidity, Suspended Material (MES), Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand at five days (BOD₅), ammonium (NH_4^+), nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), ortho-phosphates (PO_4^{3-})

In the laboratory, 5 sand samples of different granules were present 500 μm , 400 μm , 250 μm , 200 μm and 125 μm . After the filtration process, the analysis showed that the small granular size of sand accounted for 97 % of the suspended matter. During the chemical and biological application in five days the yield was estimated at 25 % and 59 %, respectively. On the other hand, the results showed a fluctuation of the concentration of nitrogen pollutants in the filtered water.

The results of this research have shown that small sand is a good candidate for wastewater treatment.

Keywords: Granulometry, Sand, filtration, industrial wastewater, physicochemical properties.

Résumé

Dans ce modeste travail on a utilisé le sable de la région Bouda ADRAR comme un lit filtrant et la différence réside dans la taille des granules dont le but d'étudier l'influence de cette différence sur ce procédé.

La démarche adoptée au cours de ce procédé est d'effectuer une analyse physicochimique d'eau usée industriel et de réaliser une étude expérimentale de filtration à l'échelle de laboratoire et de suivre l'évolution de ces dernières caractérisant l'eau à épurer avant et après filtration à l'aide du sable du désert Algérien.

Cette étude était axée sur le suivi de nombreux paramètres avant et après filtration : le pH, la conductivité électrique, la turbidité, les Matières En Suspension (MES), la Demande Chimique en Oxygène (DCO), la Demande Biochimique en Oxygène à cinq jour (DBO_5), les ammoniums (NH_4^+), les nitrites (NO_2^-), les nitrates (NO_3^-), les ortho-phosphates (PO_4^{3-}).

Au laboratoire, cinq filtres de sable de différents granules ont été réalisés à savoir 500 μm , 400 μm , 250 μm , 200 μm et 125 μm . Après le processus de filtration, l'analyse a montré que la taille granulaire la plus faible a donné des taux de rendement d'épuration de 97%, 25% et 59% pour MES, DCO et DBO_5 respectivement. En revanche, les résultats ont montré une fluctuation de la concentration de polluants azotés dans l'eau filtrée.

Les résultats de cette recherche ont montré que le sable de petite taille est un bon candidat pour le traitement des eaux usées.

Mots clés: granulométrie, filtration sur sable, eaux usées industrielles, propriétés physico-chimiques.

