

Université KASDI-MERBAH Ouargla

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : Génie des Procédés.

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement.

Présenté par :

Benseddik Asma & Serraye Sara

Thème :

*Traitement des eaux usées par Bio-coagulation –
floculation (Moringa Oleifera) : Application des
plans d'expériences*

Soutenu publiquement le :

Devant le jury composé de :

Mr.	MAA	Président	UKM Ouargla.
Mr.	Pr	Examineur	UKM Ouargla.
Mr. Ridha Lessoued	MCB	Rapporteur	UKM Ouargla.

Année universitaire : 2019/2020

Dédicace

A

Mes parents

Mes frères, mes sœurs

Et mes amies

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir guidé durant toutes ces années d'étude et de nous avoir donné la santé, la volonté, et la patience à fin de pouvoir accomplir ce travail.

*En premier lieu, nous remercions tout particulièrement notre encadreur : Mr. **LESSOUED Ridha**. Docteur de l'Université Kasdi Merbah Ouargla pour l'encadrement qu'ils nous assuré et pour sa patience avec nous durant la période de réalisation de ce travail , leurs orientations, et leur conseils judicieux et avisés ,et l'aide qu'il nous a donné pour pouvoir terminer notre mémoire .*

Nous remercions s'adressent également à nos Professeurs du département de génie de procédés de l'Université de Kasdi Merbah de Ouargla.

*Nous remercions également Mr. Le Directeurs de **CRSTRA** de **TOUGGOURT** et tout l'encadrement du centre pour l'assistance qu'il nous a apportée lors de la conduite des expériences de notre thème de recherche.*

Nous remercions aussi nos parents de nous avoir soutenir durant les années d'étude et particulièrement pendant la réalisation de notre mémoire.

*Comme nous remercions nos collègues **KHOUDRANE Lamia** , **ZOUBIR Hizia** et **BENCHIKH Nouria** .*

Enfin un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin a la réalisation de ce travail.

Résumé

Cette étude vise à traiter les eaux usées en utilisant les graines de Moringa Oleifera par coagulation-floculation en appliquant la méthodologie surface de réponse (RSM) et le plan Box Benhken (BBD). Quatre facteurs (temps de décantation, temps d'agitation, vitesse d'agitation et la concentration de Moringa) et une réponse (Turbidité) ont été étudiés. Dans les conditions optimales : temps de stabilisation (143,3 min), temps d'agitation (30min), vitesse d'agitation (100 rpm) et la concentration de Moringa (2,56g/l), une élimination importante de la turbidité a été achevée (99,83%) avec une valeur élevée de R^2 et R^2_{adj} de 97,07% et 95,18% respectivement. Ces résultats montrent la puissance remarquable de la Moringa Oleifera pour réduire la turbidité des eaux usées.

Mots clés : Eaux usées, Moringa Oleifera, Coagulation, Floculation, Optimisation, Surface de Réponse(RSM).

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام بذور المورينجا أوليفيرا باستخدام التبخثر والتلبد من خلال تطبيق منهجية سطح الاستجابة (RSM) وخطة Box Benhken (BBD). لقد تم دراسة أربعة عوامل (زمن الاستقرار، وقت التحريك، سرعة التحريك، تركيز المورينجا) مع متغير استجابة واحد وهو التعكر. بتطبيق الشروط التجريبية المثلى التالية: وقت التثبيت (143.3 دقيقة)، وقت التحريك (30 دقيقة)، سرعة التحريك (100 دورة في الدقيقة) وتركيز المورينجا (2.56 جم / لتر)، تم تقليص قيمة تعكر الماء إلى 99.83% مع الحصول على قيم مرتفعة لكل من R^2 و R^2_{adj} حيث بلغت 97.07% و 95.18 على التوالي. لقد أظهرت هذه النتائج قدرة المورينجا أوليفيرا الواضحة في الحد من تعكر مياه الصرف الصحي.

الكلمات الدالة: مياه الصرف الصحي، المورينجا أوليفيرا، تجلط الدم، التلبد، التحسين، سطح الاستجابة (RSM)

Abstract

This study aims to treat wastewater using coagulation- flocculation by Moringa Oleifera seeds and by applying the response surface methodology (RSM) and the Box Benhken plan (BBD). We investigated four factors (settling time, stirring time, stirring speed and Moringa concentration) and one response (Turbidity). We applied the following empirical conditions: stabilization time (143.3 min), stirring time (30min), stirring speed (100 rpm) and Moringa concentration (2.56g / l), significant elimination of turbidity was completed till (99.83%) with a high value of R^2 and R^2_{adj} of 97.07% and 95.18% respectively. These results show the remarkable power of Moringa Oleifera in reducing the turbidity of wastewater.

Keywords: Wastewater, Moringa Oleifera Coagulation, Flocculation, Optimization, Response surface (RSM).

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES ABREVIATIONS	
INTRODUCTION GENERALE	1

PARTIE 01 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

Introduction.....	3
I.1.Définition la pollution.....	3
I.2.Pollution aquatique	3
I.3. Origine des eaux usé	4
I.3.1. Les eaux usées domestiques	5
I.3.2.Les eaux usées industrielles	5\
I.3.3. Les eaux usées d’agriculture	5
I.3.4. Les eaux pluviales	6
I.4.Caractérisation des eaux usées.....	6
I.4.1.Caractéristiques physico-chimique.....	6
I.4.1.1.La température	6
I.4.1.2.Potentiel hydrogène (pH).....	7
I.4.1.3.La turbidité.....	7
I.4.1.4. Matières en suspension (MES)	7
I.4.1.5.Demande biologique en oxygène DBO5	7
I.4.1.6. La demande chimique en oxygène (DCO)	8
I.4.1.7.Nutriments	8
I.4.1.7.1. Azote	8
I.4.1.7.2.Le phosphore.....	8
I.4.2.Caractérisation microbiologique9	8
I.4.2.1.Les virus.....	9
I.4.2.2.les bactéries.....	9
I.4.2.3.les protozoaires	9
I.4.2.4. les helminthes	9
I.5. Traitement des eaux usées.....	10
I.5.1. Les Différents procédés d’épuration	10
I.5.1.1. Les prétraitements.....	10
I.5.1.1.1. Le dégrillag	11

I.5.1.1.2. Dessablag	11
I.5.1.1.3. Le dégraissage déshuilage.....	12
I.5.1.2. Le traitement primaire	13
I.5.1.2.1. La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant- flocculant (voie physico- chimiq.).....	13
I.5.1.2.2. La décantation (processus physique)	14
I.5.1.3. Le traitement secondaire (biologique)	14
I.5.1.3.1. Bous activées.....	15
I.5.1.3.2. Lit bactérien	16
I.5.1.3.3. Le lagunage	17
I.5.1.4. Traitement tertiaire	17
I.6. les normes Algérienne.....	18

Chapitre II :Moringa Oleifera

Introduction.....	19
II.1. Origine et répartition géographique de MO.....	19
II.2. Définition de moringa oleifera.....	20
II.3. Systématique et nomenclatur	21
II.4. Description botanique de la plant	21
II.5. Composition et propriété de moringa Oleifera	25
II.5.1. Composition des graines de MO	25
II.5.2. Propriété des graines de MO.....	25
II.6. Distribution géographique	26
II.7. Utilisation de la moringa oleifera.....	27
II.7.1. Procédé de coagulation-floculation	27
II.7.1.1. Coagulation	27
II.7.1.2. Floculation.....	28
II.7.1.3. Le potentiel zêta	28
II.7.1.5. Les principaux avantages pour l'utilisation les grains de moringa oleifera	28

Chapitre III : Plan des expériences

Introduction.....	29
III.1. Définition PE.....	29
III.2. Méthodologie expérimentale	29
III.3. Vocabulaire	30
III.3.1. Facteur	30

III.3.2. Réponse.....	30
III.3.3. Matrice d'expérience	30
III.3.5. Interaction	30
III.3.6. Plan d'expérimentat	31
III.4. Types de plan d'expériences	31
III.5. La méthode de surface de réponse	31
III.5.1. Plan composite centré	32
III.5.2. Les plans de Box-Behnken	33
III.6. Optimisation	34
III.6.1. Analyse d'un plan de surface de réponse	34
III.6.1.1. Valeur de P.....	34
III.6.1.2. L'écart type	34
III.6.1.3. La somme des carrés de l'erreur de prévision	35
III.6.1.4. Inadéquation d'ajustement (LOF)	35
III.6.1.5. Le coefficient de détermination R^2	35
III.6.1.6. Le R^2 ajusté	35
III.6.1.7. Le R^2 prévu	35
III.6.1.8. AIC, AICc et BIC.....	35
III.6.2. Analyse graphique des résultats.....	36
III.6.2.1. Courbes d'iso-réponses et surfaces de réponses	36
III.6.2.2. Diagramme de surface en 3D.....	36
III.6.2.3. Droite de Henry.....	36
III.6.2.4. Le graphe de Daniel	36
III.6.2.5. Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la conversion	37
III.6.2.6. Le digramme de pareto	37

PARTIE 02 : EXPERIMENTALE

Chapitre I : Optimisation et Modélisation

Introduction.....	38
I.1. Méthodes et matériaux	38
I.1.1. Matériel.....	38
I.1.2. Optimisation	38
I.2. Résultat et discussion	41
I.2.1. Analyse des variances (ANOVA)	42
I.2.2. Valeur de P.....	42

I.2.3. Analyse statistique des résultats	45
I.2.4. Analyses graphique	47
I.2.5. Optimisation et validation des résultats.....	50
I.3. Comparez les résultats	51

Chapitre II : Travail expérimental

II-1-Présentation de la station.....	53
II-2-Le prélèvement.....	54
II-3-Préparation des graines de Moringa Oléifera	55
II.4. Méthode	56
II.4.1. Matériels d'analyse physicochimique des eaux	58
CONCLUSION GENERALE.....	60

Liste des figures

PARTIE 01 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Origine et impacts possibles des micropolluants	4
Figure I.2 : Les différents procédés d'épuration des eaux usées	10
Figure I.3 : Le déréglage.....	11
Figure I.4 : Le dessablage	12
Figure I.5 : Le dégraissage déshuilage.....	13
Figure I.6: coagulant- flocculant.....	14
Figure I.7 : bous activées	15
Figure II.1: Moringa oleifera	20
Figure II.2: Les Tronc	22
Figure II.3 : Les feuilles	22
Figure II.4: Les fleurs.....	23
Figure II.5 : Les fruits	23
Figure II.6: Les graines	24
Figure II.7: Les racines	24
Figure II.8 La distribution de la plante Moringa Oléifera dans le monde	26
Figure II.9: Les principales utilisations des différents organes de Moringa oleifera.....	27
Figure II.10: Théorie de la double couche	28
Figure III.1: La surface de réponse	32
Figure III.2: plan composite centré	33
Figure III.3: Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs. Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre	34

PARTIE 02 : EXPERIMENTALE

Figure I.1: diagramme de Pareto pour la turbidité	45
Figure I.2: Droite de Henry des effets normalisés	46
Figure I.3: Diagramme de probabilité normale.....	47
Figure I.4: présenté les valeurs ajustées	47
Figure I.5: Graphique des effets principaux pour la turbidité.....	48
Figure I.6: Diagramme des interactions pour turbidité	48
Figure I.7 : Graphique de contour courbe iso-réponse.....	49
Figure I.8 : Diagramme de surface en 3D pour la turbidité	50
Figure I.9: courbe d'optimisation.....	51

Figure II.1 :Situation géographique de la région de Touggourt.....	53
Figure II.2 : photo représentant des points de prélèvement	54
Figure II.3 :méthode de préparation le Moringa Olifeira.....	55
Figure II.4 : balance électrique	57
Figure II.5: le jar-test	57
Figure II.6 : Multi-paramètre (PH ,O2,T ,La conductivité , salinité).....	58
Figure II.7 : turbidité mètre.....	59
Figure II.8 : centrifugeuse.....	59
Figure II.9 : étuve.....	59

Liste des tableaux

PARTIE 01 : *SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE*

Tableau I.1 :Les normes algérienne	18
Tableau II.1: La classification systématique de Moringa.....	21
Tableau II.2 :Différentes formes de végétatives de Moringa oliefera	22
Tableau II.3 : la Composition globale des graines de M. oleifera	25
Tableau II.4 : Propriétés physiques des gousses et des graines de Moringa.....	26

PARTIE 02 : *EXPERIMENTALE*

Tableau I.1: Codes et niveaux des facteurs expérimentaux	39
Tableau I.2 : temps de stabilisation, temps d'agitation, vitesse d'agitation et la concentration d'extrait de graines de Moringa Oleifera.....	40
Tableau I.3 : Résultats observées et prédites	41
Tableau I.4 : Analyse de la variances	42
Tableau I.5 : présentée la valeur de P	43
Tableau I.6: présentée la valeur de P Après l'élimination	44
Tableau I.7: comparaison les résultats	52
Tableau II.1 : Paramètres de qualité et leurs appareils de mesure	55
Tableau II.2: présente la matrice d'expérience	56

Abréviations

AIC : Critère d'information d'Akaike.

ANOVA: Analysis of variance (analyse de la variance).

BIC : Critère d'information bayésien.

CCD: Central composite design (Plan composite centré).

DBO5: Demande Biochimique en Oxygène.

DCO: Demande Chimique en Oxygène.

LOF: Lack Of Fit (inadéquation de l'ajustement).

MES : les matières en suspension.

MO : moringa oliefera

PE : plan d'expérience.

pH: Potentiel Hydrogène.

PRESS: Predicted Residual Error Sum of Squares (la somme des carrés de l'erreur de prédiction).

RSM: Response Surface Methodology (Méthodologie des Surfaces de Réponse).

UTN : unités de turbidités par néphélométrie.



Introduction général

Introduction générale

L'eau est un partenaire quotidien de l'homme utilisée pour satisfaire ses besoins quotidiens de consommation et d'hygiène, elle sert à la boisson, la cuisson des aliments, la production alimentaire et la transformation des produits, l'hygiène corporelle, l'assainissement du cadre de vie, la production d'électricité et l'usage récréatif (Sawadogo 2018).

La croissance démographique et le développement économique et urbain conduisent à une augmentation de la quantité d'eau consommée. Il en résulte une importante augmentation des volumes des rejets liquides et des flux de matières organiques polluantes qu'ils engendrent. La production d'eaux usées souvent rejetées dans l'environnement naturel sans traitement préalable provoque une menace considérable pour les écosystèmes, et génère de nombreuses maladies d'origine hydrique pouvant être à l'origine de certaines épidémies. La recherche de moyens d'épuration adéquats et réutilisation des effluents d'eaux usées traitées est devenue une option attrayante et une alternative incontournable (Amiri 2019).

La turbidité de l'eau est conventionnellement éliminée en traitant l'eau avec des produits chimiques coûteux, dont beaucoup sont importés à grands frais (Suriati 2019). D'un autre côté, le coagulant synthétique a un effet secondaire sur l'environnement en raison du produit chimique impliqué dans ce coagulant. Récemment, la recherche sur les plantes a utilisé des coagulants naturels pour divers systèmes de purification d'eau. Le Moringa oleifera est un exemple de ces matières végétales généralement cultivées dans les pays en développement avec une propriété de coagulation naturelle. Les graines de Moringa oleifera offrent de nombreux avantages dans le traitement des eaux à moindre coût en utilisant une approche respectueuse de l'environnement (Olusegun 2019).

Dans le présent travail, nous avons mis en œuvre un plan d'expérience et avons appliqué la méthodologie des surfaces de réponses (RSM), sigle d'origine anglo-saxonne pour Réponse Surface Méthodologie (Lessoued 2018). Les plans d'expériences ont de plus en plus utilisés dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche. Ils permettent en effet de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, à l'aide d'un minimum d'essais. Ils s'inscrivent donc dans la démarche constante d'amélioration de la qualité, ou de la productivité (Walter Tinsson 2010).

Dans ce mémoire nous allons aborder deux parties :

1) **La partie théorique** est composée essentiellement de trois chapitres. Le premier est réservé à l'étude bibliographique traitant un aperçu général sur les eaux usées. Le deuxième chapitre sera

consacré à présentation de la *Moringa Oleifera* et ses applications. Enfin, le troisième sera destiné à une présentation de généralités sur les plans d'expériences.

2) **La deuxième partie**, sera consacré à illustrer la méthode utilisée pour traiter les eaux usées et présenter les résultats et **les** interprétations dans deux chapitres.

Partie 01

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Généralités sur les eaux usées

I .Introduction

Les eaux usées sont toutes les eaux parvenant dans les canalisations dont les propriétés naturel les sont modifiées par l’usage domestique, industrielle, agricole etc. Elles englobent aussi les eaux de pluies qui s’écoulent dans ces canalisations.

Les eaux usées non traitées contiennent de nombreux microorganismes pathogènes qui habitent dans le tractus intestinal humain. Ils contiennent également des nutriments qui peuvent stimuler la croissance des plantes aquatique set peuvent contenir des composés toxiques ou des composés potentiellement mutagènes ou cancérogènes (Boukerroucha 2011).

I.1.Définition la pollution

Le terme pollution est largement utilisé de nos jours et recouvre de nombreuses significations et décrit de nombreuses actions qui conduisent à une dégradation de l'environnement Ce terme désigne les effets de tous les composés toxiques que les humains libèrent dans la biosphère. Comme par exemple l'état de dioxyde du carbone (CO₂) rejeté dans l'atmosphère à la suite de la combustion ou même des phosphates dans les détergents qui sont rejetés avec les effluents urbains dans les eaux continentales. (Ramade 2000).

I.2.Pollution aquatique

Une eau usée, appelée encore eau résiduaire ou effluent est une eau qui a subi une détérioration après usage. La pollution des eaux dans son sens le plus large est défini comme « Tout changement défavorable des caractéristiques naturelles (biologiques ou physico-chimiques) dont les causes sont directement ou indirectement en relation avec les activités humaines » (Zobeidi 2017).

L'évaluation du degré de pollution est basée sur des classifications globales selon les propriétés de l'effluent. La pollution des ressources en eau peut avoir de multiples origines. Il y a toutes les formes de pollutions consécutives aux activités humaines, ainsi que la pollution dite naturelle dont l'impact sur l'écosystème est moins catastrophique. Plusieurs classifications de la pollution sont mentionnées dans la littérature ; selon la taille, le pouvoir de dégradation ou la structure chimique des polluants (Bakiri 2014).

On peut classifier la pollution aquatique comme suit :

- Pollution thermique à cause des eaux de refroidissement des centrales thermiques ou nucléaires, des industries métallurgiques...
- Pollution microbiologique à cause des eaux de vanes (issues des WC)
- Pollution mécanique à cause des eaux riches en matières minérales ou organiques en suspension (gravières, mines...)...
- Pollution toxique à cause de certaines eaux industrielles.
- radioactive à cause des eaux usées des hôpitaux
- Pollution organique à cause des eaux domestiques, industries agroalimentaires...
- Pollution nutritives à cause des eaux domestiques, pollution diffuse agricole (excès d'azote et de phosphore) (Beyram 2012).

I.3. Origine des eaux usées

Les eaux usées proviennent de plusieurs sources, elle peuvent être classer comme eaux usées , Il est ainsi collectée dans le réseau d'égout, apparait comme un liquide trouble , généralement grisâtre contenant des matières en suspension d'origine minérale et organique (Laabassi 2016).

les eaux usées proviennent de quatre sources principales:

- 1-Les eaux domestiques .
- 2-Les eaux industrielles .
- 3-Les eaux d'agriculture .
- 4-Les eaux de pluviales.



Figure I.1 : Origine et impacts possibles des micropolluants (Erwan 2017)

I.3.1. Les eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques elles proviennent des différents usages domestiques et c'est un mélange d'eaux contenant des déjections humaines. Ces eaux sont généralement constituées des matières organiques dégradables et de matières minérales (Laabassi 2016) les eaux domestiques se retrouvent dans les égouts. Elles constituent l'essentiel de la pollution et se composent de :

- Des eaux de cuisine, sont généralement chargées de détergents (lavage de vaisselle) de graisses des débris végétaux et animaux qui contiennent des matières minérales en suspension.
- Des eaux de vannes, (rejets des toilettes) chargées de matières azotées des germes fécaux.
- Des eaux de salle de bains, chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, détergent, lotion actif, généralement de matières grasses hydrocarbonées (Zobeidi 2017).

I.3.2. Les eaux usées industrielles

Les déchets industriels définissent largement la qualité et le taux de pollution de ces eaux usées, les établissements industriels utilisent une quantité importante d'eau qui tout en restant nécessaire à leur bonne marche (Laabassi, 2016) ,Les eaux usées industrielles elles sont très différentes des eaux usées domestiques est varié selon l'activité industrielle elles peuvent également contenir :

- Des graisses (industries agroalimentaires, équarrissage).
- Des hydrocarbures (raffineries).
- Des métaux (traitements de surface, métallurgie).
- Des acides, des bases et divers produits chimiques (industries chimiques divers, tanneries).
- De l'eau chaude (circuit de refroidissement des centrales thermiques).
- Des matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs (Metahri 2012))

I.3.3. Les eaux usées d'agriculture

les nappes d'eaux les plus superficielles, et des eaux des cours d'eau qui préviennent de l'agriculture, est une source de pollution des eaux non négligeable, car celle-ci a porté d'engrais nitrates, phosphates et les pesticides, en quantité telle, qu'ils ne seraient pas finalement retenus par le sol et assimilés par les plantes, conduisent par ruissellement à un enrichissement en matières azotées ou phosphatées (Metahri 2012).

I.3.4. Les eaux pluviales

Les eau de pluie constitue une eau usées lorsqu'il y'a une pollution atmosphérique, l'eau pluviale va entrainer avec elle les poussières, les pollution gazeux , et hydrocarbures rejetés par les véhicules ,Les eaux de pluies, collectées normalement à la fois avec les eaux usées puis déversées dans la canalisation d'assainissement et acheminées vers une station d'épuration ,sont souvent drainées directement dans les rivières entrainant ainsi une pollution intense du milieu aquatique (Metahri 2012 ; Zobeidi 2017).

I.4.Caractérisation des eaux usées

La composition des eaux usées est extrêmement variable en fonction de leurs origines (industrielle, domestique, etc.) elles peuvent contenir de nombreuses substances sous forme solide ou dissoute ainsi que de nombreux micro-organismes en fonction de leurs caractéristiques physique chimique biologique et du charge sanitaire. Ce potentiel de pollution généralement exprimés en mg/l, est quantifié et apprécié par une série d'analyses. Qu'elle représentent ces substances peuvent être classées en quatre groupe : les micro-organismes, les matières en suspension, l'élément traces minéraux ou organiques et les substances nutritives (Laabassi 2016 ;Metahri 2012).

I.4.1Caractéristiques physico-chimique

I.4.1.1.La température

La température est un facteur important dans le milieux aqueux, varie naturellement (Metahri 2012), il faut connaitre la température de l'eau pour le bon fonctionnement des systèmes d'épuration, cela peut influencer de différentes manières (Amir 2020) :

- La solubilité des sels et des gaz. Il est établie qu'à chaque fois la température augmente, la solubilité d'un gaz diminue et donc a été affecté le cas de l'oxygène dissous.
- Aussi, plus la température de l'eau augmente, plus la concentration de saturation de l'oxygène devra diminuer, ce qui affecte sur des micro-organismes intervenants dans les processus d'autoépuration.
- Sur, la multiplication des micro-organismes.

I.4.1.2. Potentiel hydrogène (pH)

Le PH est un paramètre fondamentale de la caractérisation des eaux usées, il mesure la concentration des ions H^+ dans l'eau. La valeur du pH altère la croissance et la reproduction des micro-organismes existants dans une eau, la plupart des bactéries peuvent croître dans une gamme de pH comprise entre 5 et 9 (Amiri 2020). En général, l'activité biologique se situe entre 6,5 et 8,5 (Laabassi 2016).

I.4.1.3. La turbidité

La turbidité est une autre façon de mesurer la transparence de l'eau. Elle s'exprime en UTN (unités de turbidités par néphélométrie), c'est un paramètre de pollution indiquant la présence de la matière organique ou minérale : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, etc. qui sont présentes dans l'eau (Amiri 2020 ; Laabassi 2016).

I.4.1.4. Matières en suspension (MES)

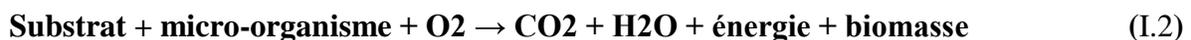
Elles représentent, l'ensemble des particules, organiques (MVS) ou minérales (MMS), non dissoutes dans l'eau. Les MES comprennent les matières décanables et les colloïdes, les MES sont responsables de la baisse de pénétration de la lumière dans l'eau, ce qui entraîne une diminution de l'activité photosynthétique (Metahri 2012).

MES s'expriment par la relation suivante :

$$\text{MES} = 30\% \text{ MMS} + 70\% \text{ MVS} \quad (\text{I.1})$$

I.4.1.5. Demande biologique en oxygène DBO₅ :

La demande biochimique en oxygène (DBO) exprime la quantité d'oxygène nécessaire dans les conditions de l'essai d'incubation durant (05) jours à une température de 20° à l'obscurité, pour assurer la destruction ou la dégradation des matières organiques d'une eau par les micro-organismes de l'eau. Pour la mesurer, on prend comme référence la quantité d'oxygène consommée au bout de 5 jours ; c'est la DBO₅. Elle se résume à la réaction chimique suivante (Amiri 2020, Metahri 2012) :



I.4.1.6. La demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène représente la quantité d'oxygène consommé pour la dégradation chimique des matières oxydable à 150°C, elle s'exprime en mg/l .

Le rapport DCO/DBO indique la valeur de la biodégradabilité d'un effluent. La détermination de la DCO repose sur la mesure de la quantité d'oxygène ou d'oxydant consommée par les matières dissoutes en suspension (Metahri 2012).

I.4.1.7. Nutriments

Parmi les éléments présents dans l'eau, il y'a deux éléments très importants parce qu'ils sont indispensables à la synthèse des micro-organismes dans le milieu aquatique. Comme : l'azote N , phosphore P (Amiri 2020).

I.4.1.7.1. Azote

L'azote présent dans l'eau peut avoir un caractère organique ou minéral, il se présente sous quatre formes (Laabassi 2016) :

- L'azote organique .
- L'azote ammoniacal (NH₄).
- L'azote nitreux (NO₂-).
- L'azote nitrique (NO₃-).

I.4.1.7.2. Le phosphore

Le phosphore se trouve dans l'eau usée à l'état minéral ou organique, il se présente sous formes (Amir 2020):

- De sels minéraux (Ortho phosphates, poly phosphates).
- De composés organiques.

I.4.2. Caractérisation microbiologique

Les micro-organismes qui se trouvent dans l'eau usée sont à l'origine du traitement biologique (Laabassi 2016), L'ensemble de ces organismes peut être classé par ordre croissant de taille en quatre grands groupes : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes (Amiri 2020).

I.4.2.1. Les virus

Les virus sont des organismes infectieux intracellulaires de très petite taille (10 à 350 nm), qui ne peuvent se multiplier que dans leur cellule hôte. Leur concentration estimée dans les eaux usées est comprise entre 10^3 et 10^4 par litre (Laabassi 2016) .

Les virus ne sont pas naturellement présents dans l'intestin, contrairement aux bactéries. Ils sont présents soit intentionnellement (après une vaccination contre la poliomyélite, par exemple), soit chez un individu infecté accidentellement. L'infection se produit par l'ingestion dans la majorité des cas, sauf pour le Coronavirus où elle peut aussi avoir lieu par inhalation (Amiri 2020).

I.4.2.2. les bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 μm . La quantité moyenne de bactéries dans les fèces est d'environ 10^{12} bactéries/g (Asano 1998).

Les eaux usées urbaines contiennent environ 10^6 à 10^7 bactéries par litre dont la plupart sont des proteas et des entérobactéries, La concentration en bactéries pathogènes est de l'ordre de 10^4 germes/l (Amiri 2020). Parmi les plus détectées sont retrouvées, les salmonelles, dont celles responsables de la typhoïde, des paratyphoïdes et des troubles intestinaux. Les coliformes thermo tolérants sont des germes témoins de contamination fécale, communément utilisés pour contrôler la qualité relative d'une eau (Zobeidi 2017).

I.4.2.3. les protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites, c'est-à-dire qu'ils se développent aux dépens de leur hôte. Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle vital une forme de résistance, appelée kyste qui peut être véhiculé par les eaux résiduaires. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées (Zobeidi 2017).

I.4.2.4. les helminthes

Les helminthes sont des vers multicellulaires. Tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes parasites. Les œufs d'helminthes sont très résistants et peuvent notamment survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols ou les plantes cultivées. La concentration en œufs d'helminthes dans les eaux usées est de l'ordre de 10 à 10^3 œufs/l (Faby 1997).

I.5. Traitement des eaux usées

I.5.1. Les Différents procédés d'épuration

Nombreux sont les procédés physiques, chimiques et biologiques qui sont utilisés pour épurer l'eau usée, Les mécanismes d'épuration peuvent être modulés de telle façon qu'on obtient inévitablement diverses puissances d'épuration. L'échelonnement des frais d'investissement est également en fonction de choix du degré d'épuration nécessaire (Amiri 2020 ; Laabassi 2016).

Les caractéristiques des eaux épurées et des boues dépendent de la nature des eaux usées à traiter et du procédé de traitement.

Pour le traitement des eaux usées domestiques, trois procédés sont appliqués selon le principal mode d'action : procédé mécanique, chimique et biologique (Figure 2) (Laabassi 2016).

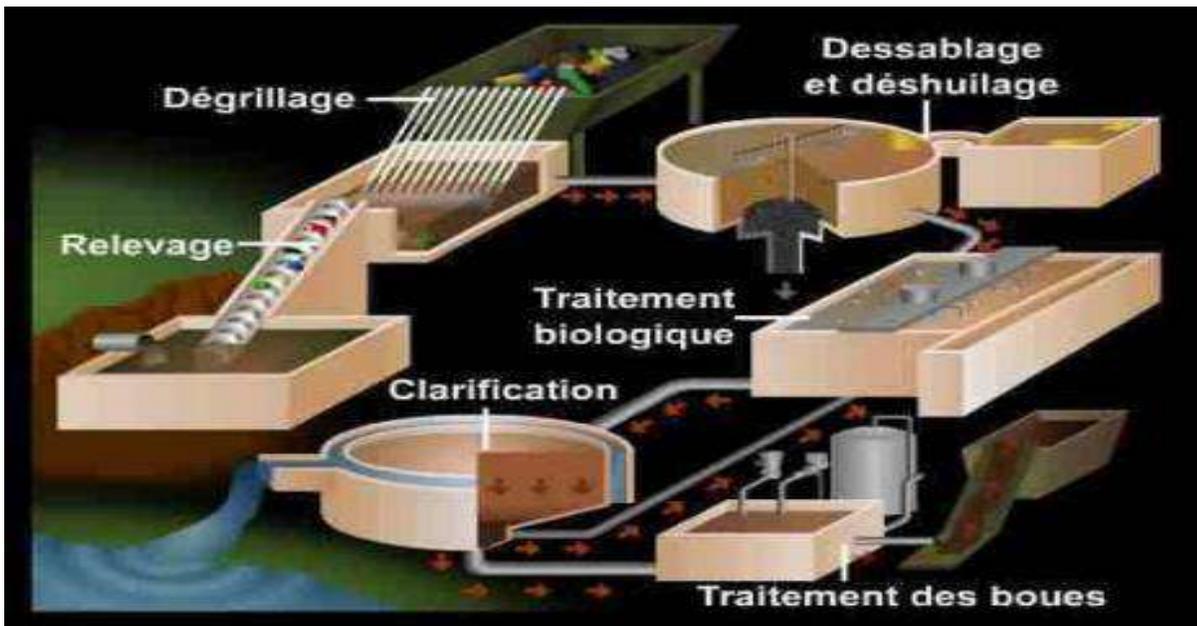


Figure I.2 : Les différents procédés d'épuration des eaux usées (Laabassi 2016)

I.5.1.1. Les prétraitements

La première phase d'épuration est la plus grossière, car elle est constituée d'un prétraitement éliminant tous les éléments solides volumineux et grossiers (sables, corps gras) qui pourraient endommager les installations par la suite. Il est à noter qu'avec ce prétraitement, 35% des éléments polluants sont retirés. Tout d'abord, l'eau passe à travers des grilles pour récupérer tous les éléments solides. La vitesse d'écoulement de l'eau issue de ce traitement subit ensuite un ralentissement pour que les particules de petite taille sédimentent (boues primaires) et que les autres objets moins denses

remontent à la surface. Malgré ce traitement primaire, il reste toujours dans l'eau tout ce qui y est dissous : éléments azotés, phosphatés, composés actifs et des particules fines (Khaoulani 2015).

I.5.1.1.1. Le dégrillage

Le dégrillage est la première étape du prétraitement des eaux usées dans la station d'épuration il consiste à faire passer l'eau usée à travers les grilles composées de barreaux placés verticalement, lors de l'opération de dégrillage, dont l'espacement est déterminé de sorte qu'il puisse retenir matières grasses les plus volumineuses et flottantes charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire, obstruer ou provoquer des bouchages dans conduites d'alimentation de l'installation, et nuire à l'efficacité de la station, le dégrillage permet aussi de protéger la station contre l'arrivée intempestive des gros objets, les éléments retenus sont, ensuite, éliminés avec les ordures ménagères (Djeddou 2014).



Figure I.3: Le dégrillage (Anonyme 2006).

I.5.1.1.2. Dessablage

Le dessablage consiste à débarrasser de l'eau des solides de taille supérieure à $100\mu\text{m}$ (sable, graviers, matières minérales lourdes, ...) par décantation sous l'effet de gravité, le dessablage a pour but d'éviter les dépôts des particules de sable et graviers afin de protéger le matériel contre l'érosion, et d'éviter des couches de sables au niveau des décanteurs primaires et réacteurs biologiques, on distingue l'écoulement de l'eau à une vitesse réduite dans un bassin appelé "dessableur" entraîne leur dépôt au fond de l'ouvrage. Les sables récupérés, par aspiration, sont ensuite essorés, puis lavés avant d'être soit envoyés en décharge, soit réutilisés selon la qualité du lavage (Metahri 2012).

Un but secondaire, mais cependant pas le moins. Extrêmement d'élimination du sable est de séparer les grains de la matière organique dans les eaux usées. Cette séparation permet à la matière organique d'être traité dans les processus subséquent (Djeddou 2014).



Figure I.4 : Le dessablage (Anonyme 2006)

I.5.1.1.3. Le dégraissage déshuilage

Les graisses et les huiles étant des produits de densité légèrement inférieure à l'eau issues non seulement des habitations, mais aussi des restaurants, des garages, des chaussées, des usines, des abattoirs, ... etc. Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (à la condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre le figeage des graisses). Ces deux procédés visent à éliminer la présence des corps gras dans les eaux usées, Les graisses perturbent les traitements biologiques en limitant la diffusion de l'oxygène dans l'eau et en gênant la décantation des boues. Par leurs propriétés chimiques, elles peuvent également être source d'odeurs nauséabondes et de colmatage des canalisations. elles sont récupérées dans un dégraisseur, ouvrage dans lequel, par diffusion de fines bulles d'air, les huiles et les graisses remontent à la surface où elles sont raclées (Sebastien 2006).



Figure I.5 : Le dégraissage déshuilage (Anonyme 2006).

I.5.1.2. Le traitement primaire

Le traitement s'effectue par voie physico-chimique et a pour but d'extraire le maximum de matières en suspension et de matières organiques facilement décantables. Trois voies de traitement sont possibles.

I.5.1.2.1. La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant- flocculant (voie physico-chimique):

Le principe est ici de favoriser l'agrégation des molécules en suspension grâce aux techniques de coagulation et de floculation de façon à augmenter la sédimentation grâce à l'obtention de floes plus gros (Attab 2011). Durant la phase de traitement primaire, une quantité importante de la pollution totale est éliminée (abattement des matières en suspension pouvant atteindre 90 % et de la demande biochimique en oxygène de l'ordre de 35 % (Zobeidi 2017).

La coagulation a pour but principale de déstabiliser les particules en suspension, c'est à-dire de faciliter leur agglomération, elle consiste à neutraliser à diminuer la charge électrique. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques : sels minéraux cationiques (sels de fer ou d'aluminium).

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 floe qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et de flottation (Metahri 2012).

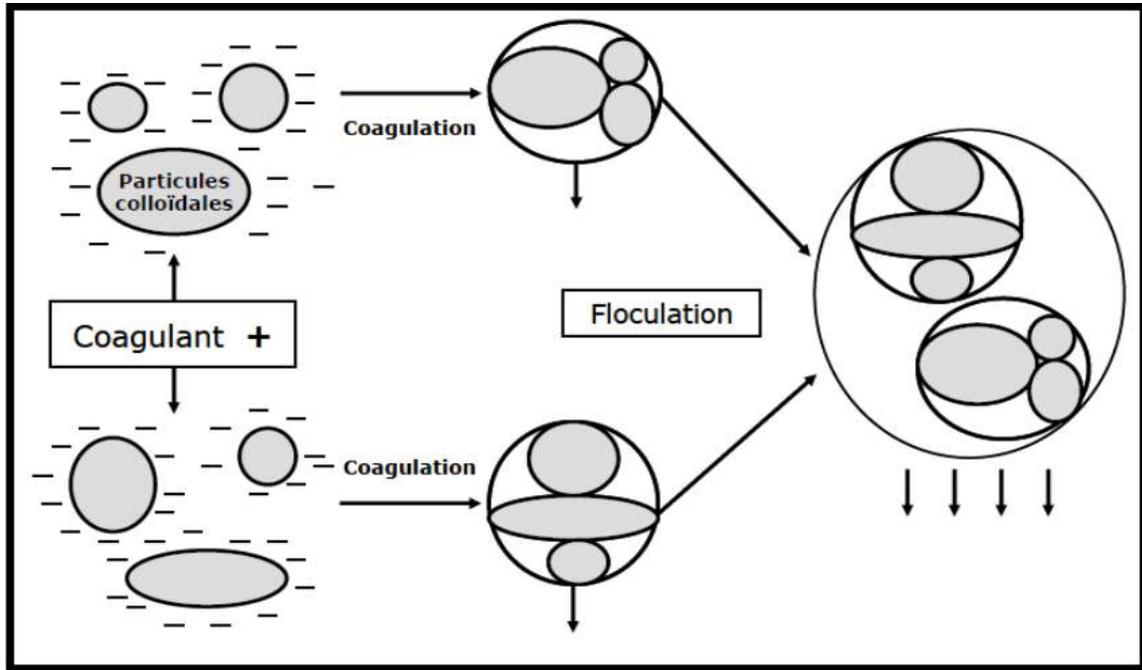


Figure I.6: coagulant- flocculant (Hernandez de leon 2006).

I.5.1.2.2. La décantation (processus physique)

Pour faciliter la précipitation des matières en suspension de diamètre inférieur à 02mm, en utilisant uniquement les forces de gravité, on fait circuler l'eau lentement dans on racle ou aspire périodiquement les matériaux rassemblés au fond, celles-ci doivent rapidement éliminées afin d'éviter la fermentation, elle rejoindront alors les boues secondaires qui seront traitées par la suite .la décantation s'effectue dans des ouvrages, muni de racleurs de fond et de surface pour extraire les boues recueillies (Laabassi 2016).

I.5.1.3. Le traitement secondaire (biologique)

Le traitement secondaire a pour objectif principal l'élimination des composés solubles d'origine organique. Parallèlement, la floculation de la biomasse permet de piéger les matières en suspension restant à l'issue du traitement primaire (Zobeidi 2017).

Des aérateurs peuvent être utilisés pour brasser l'air et optimiser l'activité des bactéries. Ces processus induisent la formation de boues au fond des bassins (clarificateur) qui sont récupérables après. Les polluants sont alors digérés par ces êtres vivants microscopiques et transformées en boues.

Une partie de ces boues retourne dans les bassins pour éviter une très grande perte en bactéries .le traitement biologique reste le procédé le plus efficace pour restaurer la qualité de l'eau (Khaoulani 2015), Plusieurs procédés existent à ce stade du traitement biologique. sont: les procédés à culture en

suspension ou procédés à boues activées, les procédés à culture fixée (lits bactériens), les procédés à décantation interne (lagunage), ..etc (Metahri 2012).

I.5.1.3.1. Boues activées

Le procédé de traitement par boues activées est un procédé de traitement biologique à culture en suspension. Il est constitué d'un réacteur biologique, où les micro-organismes flottent librement dans un liquide aéré sous forme de petits agglomérats de 3-5 mm. (Zobeidi 2017).

Le traitement par boues activées est très largement utilisé. Il s'agit d'un réacteur qui contient les eaux à traiter, dans lequel est injectée une boue chargée de bactéries. Les bactéries consomment la matière organique et contribuent aussi à l'élimination de l'azote et du phosphore. A la sortie du réacteur, l'effluent passe dans un clarificateur. La boue décantée est séparée en deux flux : l'un rejoint le réacteur (ensemencement) et l'autre est évacué vers la filière des boues. L'action des bactéries dans le réacteur nécessite de l'oxygène (Metahri 2012).



Figure I.7 : Bous activées (Anonyme 2006).

Le traitement par boues activées est généralement utilisé :

- Pour le traitement des effluents urbains.
- Pour le traitement des effluents d'industries agro-alimentaires.
- Pour le traitement spécifique des effluents de certaines industries (Laabassi 2016).

Avantages et inconvénients d'une filière à boues activées :

❖ **Les avantages :**

- Exploitation simplifiée de l'installation.
- bonne résistance à la pollution.

- obtention de boues stables non fermentescibles en quantité minimale.
- faible perte d'eau au sol.
- facilité de mise en œuvre d'une déphosphatation simultanée.
- Performances épuratoires très élevées.
- Importante quantité de volume traité.

❖ **Les inconvénient**

- coûts d'investissement assez importants.
- consommation énergétique élevée.
- nécessité de personnel qualifié et d'une surveillance régulière.
- sensibilité aux surcharges hydrauliques.
- forte production de boues qu'il faut concentrer.
- niveau de mécanisation élevé.
- besoin d'une filière d'élimination des boues (Bakiri 2014)

I.5.1.3.2. Lit bactérien

Principe

Le principe de fonctionnement d'un lit bactérien consiste à faire ruisseler les eaux usées, préalablement décantées sur une masse de matériaux poreux ou caverneux qui sert de support aux micro-organismes épurateur (Zobeidi 2017).

Définition

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

I.5.1.3.3. Le lagunage

Le lagunage est une technique extensive de traitement des eaux usées constituée de plusieurs bassins étanches en série où se développent les bactéries, algues et zooplancton.

L'épuration de la matière organique repose sur l'activité de bactéries libres, essentiellement aérobies qui utilisent l'oxygène provenant de la photosynthèse algale, et sur de longs temps de séjour de l'eau dans les bassins. Le lagunage s'appuyant sur des processus naturels d'autoépuration très dépendants des conditions climatiques locales (ensoleillement, température) (Amiri 2020).

On peut classer les lagunes en fonction de leur régime ou en fonction de leur place dans la filière épuratoire.

On aura donc, selon le premier critère, des bassins de stabilisation :

- **Anaérobies** : Ces bassins sont caractérisés par un développement important d'algues, sous forme de masse flottantes et un dégagement de gaz. Ce type de lagune est conçu pour les eaux usées industrielles.
- **Aérobies** : l'oxygène nécessaire est fourni par des algues grâce au phénomène de photosynthèse.
- **Facultatifs** : où la zone supérieure est aérobie et la zone inférieure anaérobie (Metahri 2012).

I.5.1.4. Traitement tertiaire :

Le traitement tertiaire peut être à la fois biologique et physico-chimique. En effet, ce traitement est réalisé après le traitement primaire et secondaire et regroupe un ensemble de techniques destinées à réduire la concentration des éléments nutritifs résiduels (comme le phosphore et l'azote), polluants organiques résistants et des éléments traces métalliques. C'est pour cela que les traitements tertiaires sont classés comme des traitements complémentaires qui deviennent nécessaires, pour assurer une meilleure réduction de ces substances dans les milieux naturels. On distingue différents types de traitements (Khaoulani 2015) :

- Filtration biologique par la technique d'affinage (pour l'élimination de MES ou la DBO₅).
- Déphosphatation chimique.
- Elimination de la DCO.
- Désinfection (traitement par UV ou ozone).
- clarificateur. Le traitement en UV est utilisé pour dénaturer les molécules non traitées qui sont sensibles à ces rayons.

I.6. les normes Algérienne :

Tableaux I.1 : Les normes algériennes (Joumada 2009).

Paramètres	Unité	Concentration maximal admissibles
PH	-	5,5<PH< 8,5
MES	Mg/l	600
Température	C	>30
DBO₅	Mg/l	500
DCO	Mg/l	1000
Nitrites	Mg/l	0,1
Azote global	Mg/l	150
Aluminium	Mg/l	5
Chlore	Mg/l	3
Cuivre	Mg/l	1
Fer	Mg/l	1
Magnésium	Mg/l	300
Mercure	Mg/l	0,01
Phosphore total	Mg/l	50
Sulfates	Mg/l	1

Chapitre II

A thick red line with rounded ends, starting from the left side of the page, curving downwards, then extending horizontally to the right, and finally curving downwards again.

Moringa oleifera

II. Introduction

La plante *Moringa oleifera* est considérée comme l'un des arbres les plus utiles au monde, elle possède de nombreuses propriétés intéressantes qui lui confèrent un grand intérêt scientifique (Haldar 2017).

la plante est cultivée surtout pour ses feuilles qui sont consommées fraîches, séchées et transformées en poudre. Enfin, la graine du *M. oleifera* est utilisée d'une part à des fins de floculation de l'eau et d'autre part pour produire de l'huile, dont les utilisations sont à la fois alimentaires, cosmétiques et industrielles (Marie 2015).

Des alternatives naturelles aux coagulants actuellement utilisés sont envisagées, y compris les plantes cultivées. Les graines d'un arbre tropical, *M. oleifera*, ont suscité un intérêt particulier car elles traitent l'eau à deux niveaux, agissant à la fois comme coagulant et comme agent antimicrobien

Les nombreuses utilisations économiques du *Moringa oleifera* et la facilité de propagation ont suscité un intérêt international grandissant pour cet arbre que l'on retrouve dans les pays tropicaux.

Beaucoup de pays Africains (Sénégal, Ethiopie, Mali...) et l'Inde profitent déjà des vertus miraculeuses de cette plante.

II.1. Origine et répartition géographique de MO

L'arbre *Moringa* appartient à une famille mono générique d'arbres et arbustes, les Moringacées. originaire des frontières entre l'Inde, le Pakistan et le Népal, est largement cultivé dans d'autres pays notamment l'Asie, l'Afrique et l'Amérique du sud et centrale. On le retrouve sur trois continents et dans plusieurs pays tropicaux et subtropicaux à saison sèche marquée ou même en zone aride (Afrique ,Arabie, le sud- est asiatique les iles du pacifique et l'Amérique du sud) .en raison de son adaptabilité à un large éventail de types de sols, peut être trouvé même dans les sols les plus durs et les plus secs, et elle supporte des températures jusqu'à 48 °C à l'ombre.

Dans ces pays, il est utilisé comme plante médicinale et alimentaire (Malo, 2014). Cette plante est connue sous des noms différents (Amjad et al, 2015), en Inde par exemple c'est l'arbre miracle et en anglais on le connaît sous le nom de Horseradish tree (découlant du goût d'un condiment préparé à partir de ces racines), ou encore appelé drumstick tree (découlant de la forme de ces gousses) ou bien ne verdie (qui ne meurt jamais). Au Soudan, il est connu sous le nom de Shagara al Rauwaq qui signifie l'arbre purificateur (Louni 2009).

Le *Moringa* était très apprécié dans l'antiquité, les romains, les grecs et les égyptiens extrayaient

l'huile des graines et l'utilisaient pour fixer les parfums et comme soin de peau (Diouf 1999). Au 19^{ème} siècle, des plantations de *Moringa* aux Antilles exportaient l'huile vers l'Europe pour l'industrie de la parfumerie et comme lubrifiant mécanique. Les habitants du sous-continent indien ont depuis longtemps utilisé les fruits de *Moringa* comme légume. Les feuilles comestibles sont consommées à travers l'Afrique de l'Ouest et dans certaines parties d'Asie (Fuglie 2001).

Des dizaines d'organisations humanitaires promeuvent désormais l'utilisation du *Moringa* dans les régions pauvres pour lutter contre la malnutrition et ses effets néfastes sur l'organisme (Pham 2004).

Il est devenu l'un des plus utiles nutriments humains, de la médecine traditionnelle, les utilisations industrielles et pour la purification de l'eau (Fahey 2005).

II.2. Définition de *moringa oleifera*:

Moringa Oleifera, est une espèce de petit arbre pouvant mesurer jusqu'à 10 m de la famille des *moringaceae*, rapidement reconnaissable (Eilert 1981), par sa couronne ouverte et tombante, des branches fragiles et un feuillage plumeux de feuilles trépanées caduques ou persistantes, son écorce épaisse et blanchâtre et par ses fruits de section triangulaire (Roloff et al, 2009).



Fig II.1 : *Moringa oleifera* (Sivanesane et al, 2010)

Elle est acclimatée dans presque toutes les régions tropicales, c'est une plante facile à entretenir car elle n'a pas d'exigences spécifiques, elle supporte une large gamme de types de sols et de conditions pluviométriques, elle se caractérise par une rusticité remarquable et une croissance initiale très rapide, elle fleurit dès la première année de plantation. L'introduction de cette plante dans un environnement riche en biodiversité peut être bénéfique à la fois pour l'exploitant dont ses jeunes gousses et ses feuilles sont utilisées comme légumes, les graines peuvent être utilisées comme détergent, plante médicinale pour la purification de l'eau ou pour l'écosystème environnant (Foidl et al, 2001).

II.3. Systématique et nomenclature

Tableau 01 : La classification systématique de *Moringa* (Laleye et al, 2015).

Règne	Végétal
Embranchement	Spermaphytes
Sous embranchement	Angiosperme
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Dillenidae
Ordre	Capparidales
Famille	Moringaceae
Genre	<i>Moringa</i>
Espèce	<i>Moringa oleifera</i> Lamarck

II.4. Description botanique de la plante

Moringa est un arbre à croissance rapide, qui peut atteindre 7 à 12 mètres de hauteur et dont le tronc mesure 20 à 40 cm de diamètre. Il a une forme largement ouverte, généralement parapluie couronne et habituellement une seule tige. Son bois est doux et son écorce est lisse. Il a tendance à être profondément enraciné. Ses feuilles sont imparipennées 3 rachis à 6 cm de long avec 2 à 6 paires de pinnules. Chaque pinnule à 3 à 5 folioles qui sont de 1 à 2 cm de long. La foliole terminale est souvent légèrement plus grande. Ses tracts sont tout pâle quand il est jeune, mais devenir plus riche en couleur avec maturité. Fleurs de couleur crème émergent en panicules odorante pendant périodes de sécheresse ou de stress lorsque l'arbre perd ses feuilles. Les gousses sont triangulaires en section transversale de 30 à 50 cm long et de légumineuses comme en apparence. Les graines huileuses sont noires et ailés (Dalla 1993).

Tableau II. 2 : Différentes formes de végétatives de *Moringa oleifera*

Morphologie (Aspect)	Description
 <p data-bbox="342 1035 646 1066">Figure II.2 : Les Tronc</p>	<p data-bbox="824 365 1430 835">Tronc: Le tronc est généralement droit, il mesure de 20 à 40 cm de diamètre mais il est parfois très peu développé. En général, il atteint 1,5 à 2 m bien qu'il puisse parfois atteindre les 3m de haut avant de se ramifier en branches (Foidl et al,2001). L'écorce est lisse à grosse lenticelle de couleur gris foncé violacé. Le bois Moringa est mou, très tendre et souvent attaqué par les termites (Besse 1996).</p> <p data-bbox="824 982 1430 1125">Les branches : poussent de manière désorganisée et canopée est en forme de parasol (Foidl et al. 2001).</p>
 <p data-bbox="334 1875 659 1906">Figure II.3 : Les feuilles</p>	<p data-bbox="824 1199 1430 1835">Les feuilles :Sont caduques, recouvertes d'un duvet gris lorsqu'elles sont jeunes, et se développent principalement dans la partie terminale des branches, ont un long pétiole mesurant 20 à 70 cm de long, comptent 2 à 6 paires de pinnules comprenant chacune 2 à 5 paires de pinnules secondaires, divisées elles-mêmes en 1 à 2 paires de folioles opposés plus une foliole terminale à l'apex plus grande que les autres, de forme ronde ou ovale de 1 à 2 cm de long (Hedji et al, 2014).Les feuilles peuvent être cueillies plusieurs fois dans l'année.</p>

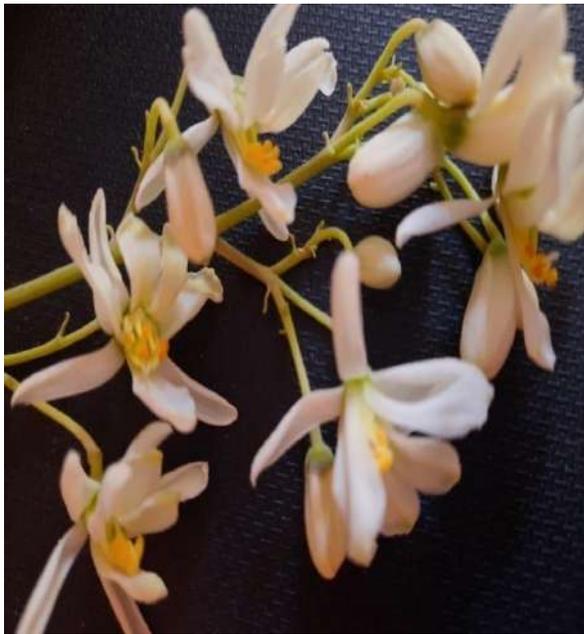


Figure II.4 : Les fleurs

Les Fleurs : mesurent 2,5 cm de large et se présentent sous forme de panicules axillaires et tombantes de 10 à 25cm (Foidl et al, 2001). après 8 à 12 mois, l'arbre commence à fleurir sur une base continue tout au long de l'année .

L'inflorescence est en panicule aux fleurs irrégulières. Ces dernières bisexuées de couleur blanche tirant sur le crème (Besse 1996). Elles sont généralement abondantes et dégagent une odeur agréable (Ndabigengesere 1998).



Figure II.5 : Les fruits

Les fruits :Forment des gousses à trois lobes, sont initialement vert clair, minces et tendres, devenant finalement marron et ferme. mesurant 20 à 60 cm de long et de 2 cm de diamètre , ses côtés forment un triangle, la capsule a une extrémité aiguë, une surface bosselée qui pendent des branches. Lorsqu'ils sont secs, ils s'ouvrent en trois parties, en libérant jusqu'à 26 graines .Un arbre peut produire 15000 à 25000 graines par an (Yusoff 2016).

Les Graines : Les graines sont rondes empilées sur trois rangées centrales chacune est munie latéralement de trois ailes blanches. Elles ont un diamètre de 10 à 12 mm (Besse



Figure II.6 : les graines

1996).Un arbre peut produire 15000 à 25000graines/an. Une graine pèse en moyenne 0.3g et la coque représente 25% du poids de la graine (Makkal et Becker 1997). La récolte des graines se fait 2 fois par an en Avril-Mai et Septembre-Octobre (Maevalandy 2006).



Figure II.7: Les racines

Les Racines :Le système racinaire est de structure tubulaire, il est formé d'un pivot central qui peut s'enfoncer dans le sol jusqu'à 1,30 m de profondeur lui offrant ainsi une grande résistance à la sécheresse ,tubéreuses à odeur piquante caractéristique, dotée de racines latérales plutôt clair semées (Roloff et al, 2009). Les arbres cultivés à partir de graines développent une profonde racine pivotante robuste avec un système à large diffusion composée d'épaisses racines latérales tubéreuses. La racine pivotante ne se développe pas sur les arbres reproduits à partir de boutures (Parrotta 2009).

II.5. Composition et propriété de *Moringa oleifera*

II.5.1. Composition des graines de MO

Des analyses nutritionnelles ont montré que les graines contiennent des minéraux, des acides aminés essentiels, des acides gras et d'autres composés bioactifs (Dhakar et Maurya 2011).

Vitamines A, B, et C, une teneur élevée en fer et en protéine. Les graines contiennent également des glucosinolates, des huiles (dont triglycérides, acides gras et lipides polaires) et des polyphénols en tant que principe actif dans des compositions cosmétiques et/ou dermatologiques. Les graines contiennent des composés tels que les isothiocyanates. Le Tableau démontre la composition chimique par 100g de graine sèche (Anwar et al. 2003).

Tableau II.3 : la Composition globale des graines de *M. Oleifera* (Leone, 2016).

Détermination	1	2	3
Poids moyen des gousses (g)	7,60	-	7,95
Poids moyen des graines par gousse (g)	3,59	5,03	4,83
Nombre moyen de graines par gousse	12,00	17,00	16,00
Poids moyen de 100 graines (g)	29,90	29,60	30,20
Poids moyen de 100 amandes (g)	21,20	-	22,50
Poids de l'amande par rapport au poids de la graine (%)	72,50	-	74,50
Teneur en eau de l'amande (%)	27,50	-	25,50
Poids de la coque par rapport au poids de la graine (%)	4,50	-	6,50
Teneur en eau de la coque (%)	9,20	-	12,90
Teneur en eau de l'amande (%)	5,80	-	7,50
Teneur en eau de la coque (%)			
Teneur en eau de la graine (%)			

II.5.2. Propriété des graines de MO

Les graines de moringa des vertus anti-inflammatoire et antibiotique pour cette raison, elles constituent un bon traitement pour diverses infections et des maladies, comme celles sexuellement transmissibles, la goutte, les rhumatismes ou l'arthrite (Costa et al, 2017). Les graines de *Moringa* contiennent des polyélectrolytes cationiques qui ont montré leur efficacité dans le traitement des eaux

en remplacements du sulfate d'alumine et des autres flocculant, il est totalement biodégradable ce qui peut être intéressant dans la conservation de la biodiversité. la Mo-CBP3, est une protéine antifongique liant la chitine qui inhibe la germination et la croissance mycélienne des champignons phytopathogènes (James et Zikankuba 2017).

Tableau II.4 : Propriétés physiques des gousses et des graines de *Moringa* (Foidl et al,2001).

Les composés	g/100g	%
Les proteïns	(29,4±33,3)	34,51% - 36,5%,
les huiles	(34,7±40,4)	38,62% - 40,06%,
Fibres	(6,8±8,0)	10,92% - 12,16%
Carbohydrates	(16,5±19,8)	19,00% - 20,29%
la valeur calorique		450,36 - 451,32 kcal 100 g-1

II-6-Distribution géographique



Figure II.8 : La distribution de la plante *Moringa Oleifera* dans le monde (Saini et al, 2016)

II.7. Utilisation de la Moringa Oleifera

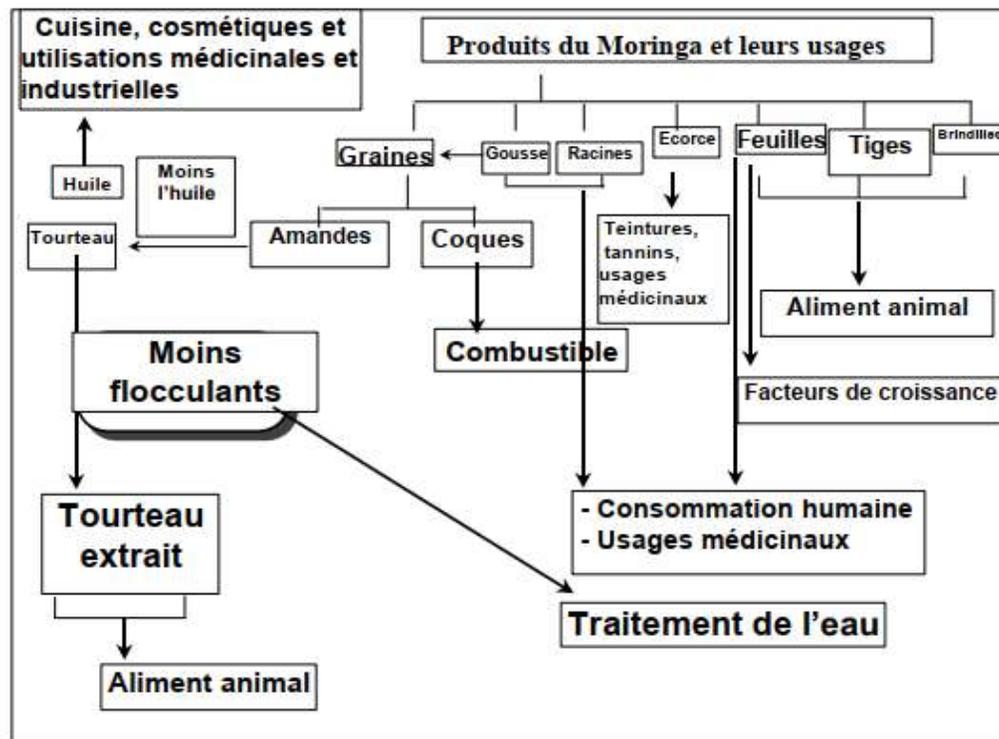


Figure II.9 : Les principales utilisations des différents organes de *Moringa Oleifera* (Foidl et al, 2001).

II.7.1. Procédé de Coagulation-floculation

La couleur et la turbidité d'une eau usées sont dues à la présence de particules de très faible diamètre : les colloïdes, leur élimination baser sur la pouceuse coagulation- floculation (Cherif 2012).

Coagulation- floculation, est une technique relativement simple qui peut être utilisée avec succès pour le traitement d'eaux usées (Lessoued 2018), Ce traitement se décompose en 2 étapes successives :

II.7.1.1. Coagulation

Déstabilisation électrostatique des particules colloïdales chargées négativement par addition la poudre de *Moringa Oleifera* sous une agitation vive. Les ions positifs sont étroitement collés au colloïde et forment la couche liée STERN, qui attire à son tour des anions accompagnés d'une faible quantité des cations, c'est la couche diffuse ou de GOUPY, Il y a donc formation d'une double couche ionique. La valeur du potentiel à la surface de la couche est appelé potentiel Zêta. Les colloïdes étant chargés négativement, ce potentiel est négatif. Les particules de potentiel Zêta négatif se repoussent très fortement. C'est pourquoi, les colloïdes sont très stables et inhibent toute agglomération.

L'élimination des colloïdes passe donc par l'annulation du potentiel Zêta afin (Lessoued 2018)
 L'annulation du potentiel zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations (Cherif 2018). La figure 01 clarifier les double couche :

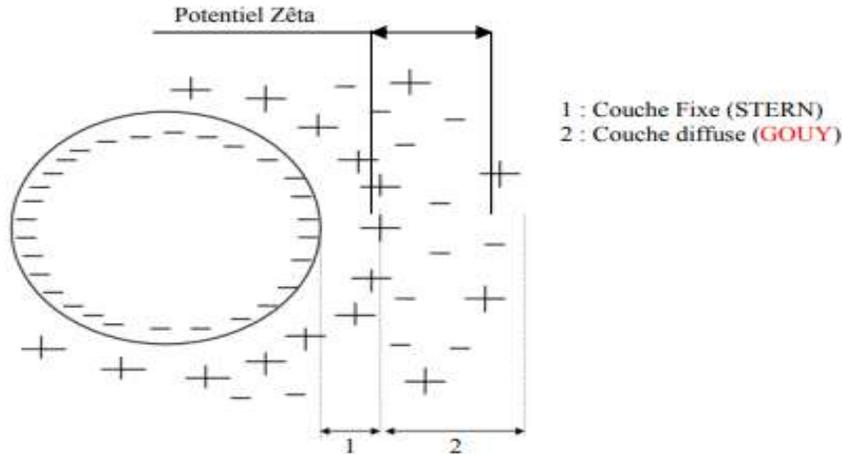


Figure II.9: Théorie de la double couche (Zongo 2009)

II.7.1.2.La floculation

À l'aide d'un mélange lent, qui entraîne une agglomération des colloïdes de favoriser, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on peut facilement éliminer (Metahri 2012).

II.7.1.3.Le potentiel zêta

La potentiel zêta se situe à la limite extérieure de la couche liée. Ce potentiel est responsable du comportement électrocinétique de la particule colloïdale dû à la charge effective de l'ensemble particule-double couche. Quand la charge effective diminue, le potentiel zêta et la stabilité diminuent.

L'annulation du potentiel zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations (Cherif 2018).

II.7.2.Les principaux avantages pour l'utilisation les grains de moringa oleifera

- Le coût de la graine de Moringa, est ou peut-être, dans certains pays compétitif par rapport aux flocculant industriels. Cependant on manque de recul et d'études économiques sur ce point.
- C'est un produit d'origine tropicale, intéressant pour les pays du sud car ne faisant pas l'objet de taxes d'importation et ne nécessitant pas de paiement en devises.
- Les coagulants métalliques induisent une pollution qu'il faut contrôler, le Moringa ne contient pas de produits chimiques nocifs laissant des traces dans les eaux.
- Les erreurs de dosages n'induisent pas de toxicité (Suriati 2019)

Chapitre III

PLANE D'EXPERIENCE

III. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et expliquer non pas la totalité de la méthode des plans d'expériences mais uniquement les fondements de base et l'importance de cette méthode dans la recherche scientifique. Cette technique intéressante sera particulièrement développée et utilisée dans le cinquième chapitre. Avec les plans d'expériences, on obtient le maximum de renseignement par le minimum d'expériences. Ils apportent une méthodologie permettant d'atteindre une meilleure connaissance du système observé par un minimum d'essais et un maximum de précision. La méthode des plans d'expérience permet de prévoir le nombre d'expériences à accomplir en fonction d'un objectif bien défini, d'étudier plusieurs facteurs simultanément, de réduire la dispersion liée à la mesure, d'apprécier les effets de couplage entre facteurs, d'évaluer l'influence respective des facteurs et leurs interaction (Mokdad 2012).

III.1. Définition PE

Un plan d'expériences est une méthode pour planifier ou organiser les expériences scientifiques et industrielles dans le but de retirer l'information correspondante à l'objectif fixé préalablement. Leur but est d'obtenir un maximum d'informations avec un minimum d'expérimentations par rapport à l'objectif que l'on s'est fixé. Les plans d'expériences sont appliqués dans différents domaines des sciences : agronomie, biologie, calcul numérique, chimie, électronique, marketing , mécanique, physique... et cela, à tous les niveaux, depuis la recherche fondamentale jusqu'à la satisfaction du client (Bouzaouit 2016).

III.2. Méthodologie expérimentale

- La démarche à respecter est la suivante (Iboukhoulef 2014):
- Définition de l'objectif.
- Choix des réponses expérimentales.
- Choix des facteurs et du domaine expérimental d'intérêt
- Etablir la stratégie expérimentale.
- Construction de la matrice d'expériences
- Construction du plan d'expérimentation.

- Expérimentation.
- Calcul des estimations des informations recherchées.
- Interprétation des résultats.

III.3. Vocabulaire

III.3.1. Facteur

On appelle facteur, toute série d'éléments de même nature conditionnant le phénomène étudié. Un facteur peut être qualitatif ou quantitatif, continu ou discontinu, contrôlable ou non contrôlable.

- Les facteurs contrôlés sont effectivement étudiés au cours d'une expérience.
- Les facteurs non contrôlés sont les facteurs difficilement maîtrisables et sont la source de variations résiduelles car fréquemment considérés comme aléatoires (Kimouche 2008).

III.3.2. Réponse

Ce sont les grandeurs étudiées ou grandeurs de sortie. Dans le cadre des processus d'optimisation, la grandeur étudiée dont on recherche les meilleures valeurs est généralement appelée fonction objectif ou fonction réponse. On définit également les fonctions de contrainte qui définissent les expériences non réalisables.

Les fonctions objectif et de contrainte peuvent être une réponse particulière ou une combinaison de plusieurs réponses du système étudié (Vivier 2002).

III.3.3. Matrice d'expérience

Une matrice d'expérience est un objet mathématique qui représente l'ensemble des expériences à réaliser. Elle est toujours écrite sous forme codée. Elle est constituée de N lignes correspondants au nombre d'expérience et k colonnes correspondant au nombre de variables (Iboukhoulef 2014).

III.3.5. Interaction

Lorsque l'effet d'un facteur dépend de la valeur prise par un autre facteur cela se traduit par une interaction entre les deux facteurs (Kimouche 2008).

III.3.6. Plan d'expérimentation

Un plan d'expérimentation correspond à la «traduction» de la matrice d'expériences en une matrice directement utilisable par l'expérimentateur car les variables seront exprimées en variables naturelles. Le plan d'expérimentation doit faire l'objet d'une analyse minutieuse pour voir si toutes les expériences sont réalisables et si elles ne présentent aucun risque (Iboukhoulef 2014).

III.4. Types de plan d'expériences

Un plan d'expériences définit un ensemble d'expériences réparties dans le domaine expérimental. Il existe de nombreux types de plans d'expériences et le choix de l'un d'eux peut s'avérer difficile. Le principe de ce choix est de sélectionner le plan le plus rentable, présentant le moins d'expériences possible pour obtenir le plus d'informations possible. Ce choix dépend de l'objectif fixe, des méthodes d'analyse utilisées, des contraintes expérimentales, des ressources, du comportement étudié (lié aux facteurs et aux variables d'intérêt) et de l'expertise à disposition. Cette section dresse une liste non-exhaustive et synthétique des plans d'expériences existants.

Deux familles de types de plans peuvent être distinguées. D'une part, les plans "usuels" ont été conçus pour des applications sur des systèmes réels, pour lesquels les expériences peuvent être très coûteuses, longues et difficiles à mettre en place. D'autre part, les types plus spécifiquement utilisés pour des applications numériques, dont le but principal est de générer une distribution d'expériences remplissant de la meilleure façon le domaine expérimental (Gaëtan 2017).

Parmi les plans d'expérience les plus utilisés sont (Goupy 2005) :

- Plans factoriels complets à deux niveaux.
- Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux.
- Autres plans à deux niveaux.
- Plans à plusieurs niveaux.
- Plans pour surfaces de réponse.
- Plans de mélanges.

III.5. La méthode de surface de réponse

La méthodologie des surfaces de réponse (MSR) constitue le second volet de la méthode des plans d'expériences. Cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative.

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'études par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans interactions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques de second degré. On fait alors appel aux plans pour surface de réponses. Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré.

Il existe plusieurs types de plans du second degré : les plans composites (CCD), les plans de Box-Behken (BBD) et les plans de Doehlert (Wahadame 2006) :

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2 :

- Pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (\text{III.1})$$

- Pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \quad (\text{III.2})$$

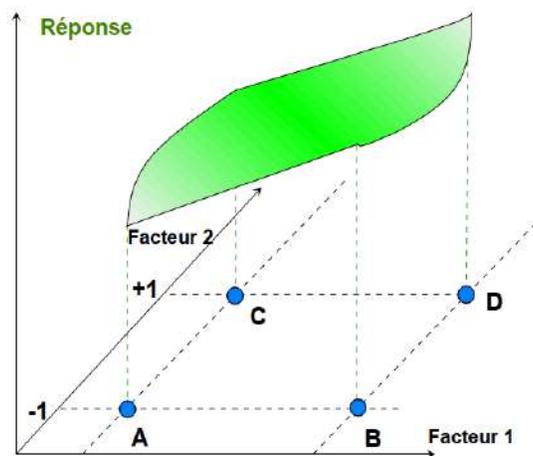


Figure III.1: La surface de réponse (Goupy 2005).

III.5.1. Plan composite centré

Les plans composites se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle (termes du premier degré et termes d'interactions). Si les tests de validation sont

positifs (la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point), l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs, on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré. Les essais supplémentaires sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par des nouveaux points centraux.

Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile. Les plans composites présentent donc trois parties

- Le plan factoriel : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine d'étude.
- Le plan en étoile : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont, en général, tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.
- Les points au centre du domaine d'étude, on prévoit toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile (Mokdad 2012)

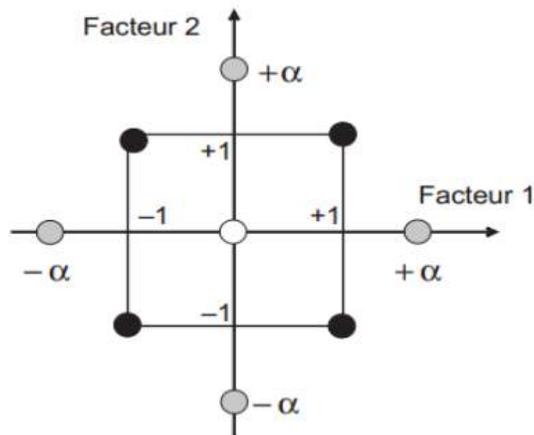


Figure III.2 : plan composite centré (Goupy 2005).

III.5.2. Les plans de Box-Behnken

Box et Behnken (1960) ont introduit un type différent de plans d'expériences pour les modèles du deuxième ordre qui permettent l'estimation de certaines interactions

Définition : Un plan de Box et Behnken est une fraction d'un plan factoriel complet 3^m qui permet d'estimer un modèle du second ordre (Kimouche 2008).

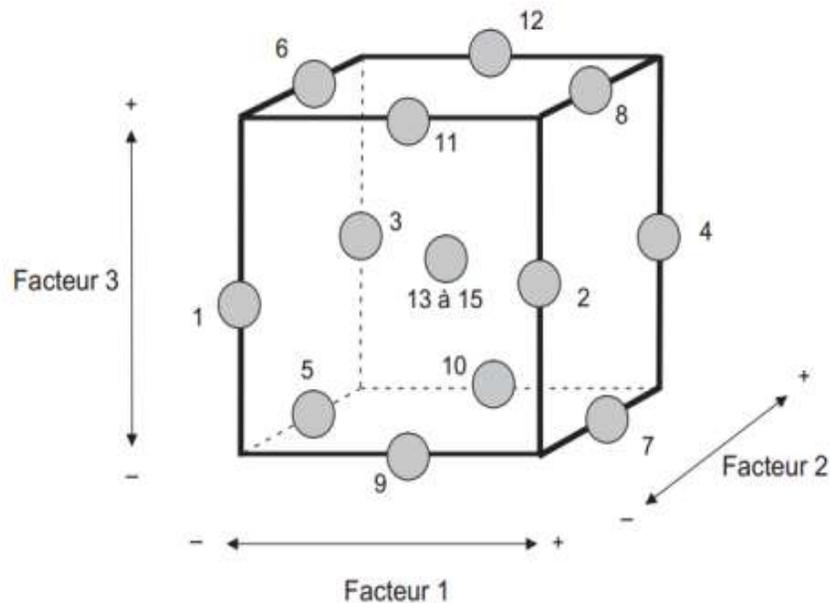


Figure III.3: Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs. Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre (Goupy & Creighton 2006).

III.6. Optimisation

III.6.1. Analyse d'un plan de surface de réponse

L'analyse de la variance est appelée « Analysis of Variance » dans la littérature anglo-saxonne ; son appellation est couramment abrégée en ANOVA. « D'une façon générale, en matière de régression, le principe de l'analyse de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle relative à l'équation de régression ou au modèle utilisé, et une composante résiduelle, la première devant être testée par rapport à la deuxième ».

Les composantes factorielle et résiduelle seront mathématiquement représentées par des carrés moyens, c'est-à-dire des variances.

En définitive, l'intérêt de l'analyse de variance est de pouvoir tester de manière absolue l'influence des facteurs sur les variations d'une réponse donnée (Vivier 2002).

III.6.1.1. Valeur de P

La statistique la plus importante dans le tableau de l'analyse de la variance est la valeur de P. Cette valeur peut prendre des valeurs comprises seulement entre 0 et 1. Si elle est inférieure à 0.05, on conclut que l'effet est significatif et si elle est inférieure à 0.01, il est possible de conclure que le facteur est hautement significatif (Bouzaouit 2016).

III.6.1.2. L'écart type S

S représente l'écart type entre les valeurs de données et les valeurs ajustées. S est mesuré dans les unités de la réponse (Minitab).

III.6.1.3. La somme des carrés de l'erreur de prévision :

Il permet d'évaluer la capacité de prévision du modèle. En général, plus la valeur de la somme des carrés de l'erreur de prévision (PRESS) est petite, meilleure est la capacité de prévision du modèle. La valeur de PRESS est utilisée pour calculer le R^2 prévu (Lessouade 2018).

III.6.1.4. Inadéquation d'ajustement (LOF)

Le test de inadéquation d'ajustement compare la variation autour du modèle avec la variation pure dans les observations répliquées. Ce test a mesuré l'adéquation des différents modèles basés sur l'analyse de surface de réponse (Keyhani et al, 2012)

III.6.1.5. Le coefficient de détermination R^2

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle suivant (Rabier 2007):

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

III.6.1.6. Le R^2 ajusté

On définit de la même façon le coefficient de détermination ajusté R^2_{aju} comme étant la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul, relativement aux degrés de liberté correspondants (Bouzaouit 2016).

III.6.1.7. Le R^2 prévu

Il permet de déterminer la capacité du modèle à prédire de nouvelles observations. Plus la valeur du R^2 prévu est élevée, plus la capacité de prévision du modèle est importante. La valeur du R^2 prévu est comprise entre 0 et 100 %. Une valeur de R^2 prévu considérablement inférieure à R^2 peut être un signe de sur ajustement du modèle (Lasseouade 2018).

III.6.1.8. AIC, AICc et BIC

Le critère d'information d'Akaike (AIC), le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) et le critère d'information bayésien (BIC) sont des mesures de la qualité relative d'un modèle qui rend compte de l'ajustement du modèle et du nombre de termes qu'il contient (Minitab).

III.6.2. Analyse graphique des résultats

III.6.2.1. Courbes d'iso-réponses et surfaces de réponses

L'exploitation du modèle validé est aussi réalisée graphiquement en traçant en 2D 1 les courbes d'iso-réponses. Pour ce faire, on choisit, à chaque fois, deux variables à étudier. Les niveaux des autres variables étant fixés (par exemple, à leur valeur moyenne). En ajoutant une troisième dimension au graphe des courbes d'iso-réponses, pour indiquer les valeurs de la réponse, on obtient une surface de réponses illustrant l'évolution de la réponse en fonction des niveaux des deux facteur (Bouzaouit 2016).

III.6.2.2. Diagramme de surface en 3D

Un diagramme de surface en 3D affiche une vue en trois dimensions de la surface. Comme les graphiques de contour, ils permettent d'établir les valeurs de réponses et les conditions d'utilisation souhaitables. Les diagrammes de surface en 3D peuvent donner une image plus claire de la surface de réponse que les graphiques de contour (Lassouade 2018).

III.6.2.3. Droite de Henry

Généralement une droite de Henry est utile pour vérifier la normalité des données. C'est une technique graphique pour évaluer si ces données sont distribuées normalement ou pas. Le résidu est la différence entre la valeur observée et la valeur prédite de la régression. Si les points sont près d'une ligne droite on dit que les données sont distribuées normalement. Les droites de Henry sont utiles pour évaluer la normalité d'un fichier de données, même lorsque le nombre d'observations est assez faible (Bouzaouit 2016).

III.6.2.4. Le graphe de Daniel

Permet de tester graphiquement la normalité de la répartition des valeurs des effets. Pour cela, leurs valeurs sont reportées sur l'axe des abscisses, alors que les ordonnées donnent une échelle de probabilités à distribution normale (obtenue par la transformation d'une échelle régulière linéaire de valeurs par utilisation de la fonction normale de répartition inverse) (Vivier 2002).

III.6.2.5. Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la conversion

Les diagrammes des interactions sont généralement utilisés pour visualiser les interactions pendant une ANOVA, dans laquelle l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre facteur. Le diagramme suivant montre que les droites parallèles indiquent l'absence d'interactions. Plus la différence de pente est grande entre les lignes, plus le degré d'interaction est élevé (Bouzaouit 2016).

III.6.2.6. Le digramme de pareto

Le diagramme de Pareto est un outil graphique d'analyse, de communication et de prise décision très efficace. Il se présente sous la forme d'un histogramme trié avec superposition d'une courbe de cumul (Hohmann 2020).

Partie 02

EXPÉRIMENTALE

Chapitre I



Optimisation et modélisation

I. Introduction

La coagulation par les graines de Moringa Oleifera est un traitement puissant pour la dépollution des eaux usées. Dans ce chapitre nous allons aborder les résultats d'optimisation et modélisation en appliquant le plan Box Behnken. Les données utilisées dans ce mémoire sont tirées de la référence suivante : (Olusola et al, 2019).

I.1. Méthodes et matériaux

Pour effectuer le traitement des eaux usées de la station d'épuration des eaux usées (STEP) de Touggourt par de Moringa oleifera on suit les étapes suivantes :

- Collecte des eaux usées après avoir traité le processus de traitement physique (Le dégrillage, dessablage, le dégraissage déshuilage).

- Préparation des graines de la Moringa oleifera à travers les étapes suivantes :

- Peler les graines, c'est-à-dire les retirer de leur pelage.
- Écraser-les pour obtenir une poudre fine.
- Peser de la poudre dans l'eau distillée.
- Filtrer-les à l'aide d'un chiffon de gaz.
- Enfin, les échantillons obtenus sont utilisés pour traiter 300 ml d'eau usée.

I.1.1 Matériel

-La floculation a été effectuée à l'aide d'un Jar test à six pédales (SW6)

-La turbidité a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre portable (2100Q)

I.1.2 Optimisation :

Pour étudier l'optimisation du processus de coagulation des eaux de surface, on doit utiliser les plans d'expériences (Minitab) combiné avec la méthodologie de la surface de réponse (RSM). Quatre facteurs affectant la turbidité de l'eau ont été identifiés (temps de stabilisation, temps d'agitation, vitesse

d'agitation et concentration d'extrait de graines de Moringa Oleifera) comme indiqué dans le tableau suivant.

29 expériences ont été générées à l'aide du plan Box Behnken Design (BBD). Les données expérimentales du processus ont été analysées

Tableau I.1: Codes et niveaux des facteurs expérimentaux

Facteur		Niveaux variables codés		
		-1	0	+1
temps de stabilisation (min)	X ₁	90	120	150
temps d'agitation (min)	X ₂	10	20	30
vitesse d'agitation (rpm)	X ₃	100	150	200
La concentration de MoringaOleifera (g/l)	X ₄	2	3	4

Nous avons ajouté le plus d'améliorations pour éliminer la turbidité sur des eaux de surface pour que nous prenions les valeurs des résultats de turbidité qui ont été trouvés dans le tableau(4) et les convertir en pourcentages avec la relation suivante :

$$\text{Turbidité}\% = ((800 - \text{Turbidité}) / 800) \times 100 \quad (\text{I.1})$$

Les résultats obtenus à partir de cette relation ont été utilisés pour répéter le processus d'optimisation montré dans le tableau suivant:

Tableau I.2 : temps de stabilisation, temps d'agitation, vitesse d'agitation et la concentration d'extrait de graines de Moringa Oleifera.

N° : Essais	temps de stabilisation (min)	temps de d'agitation (min)	vitesse d'agitation (rpm)	(CEMO) (g/l)	Rendement d'élimination de turbidity
1	90	10	150	3	98,47
2	150	10	150	3	96,75
3	90	30	150	3	97,25
4	150	30	150	3	97,62
5	120	20	100	2	98,37
6	120	20	200	2	93,88
7	120	20	100	4	98,16
8	120	20	200	4	96,87
9	90	20	150	2	94,07
10	150	20	150	2	96,10
11	90	20	150	4	98,42
12	150	20	150	4	95,86
13	120	10	100	3	99,31
14	120	30	100	3	99,20
15	120	10	200	3	96,70
16	120	30	200	3	96,23
17	90	20	100	3	96,23
18	150	20	100	3	98,88
19	90	20	200	3	96,07
20	150	20	200	3	92,72
21	120	10	150	2	96,53
22	120	30	150	2	96,90
23	120	10	150	4	98,27
24	120	30	150	4	98,32
25	120	20	150	3	99,02
26	120	20	150	3	98,41
27	120	20	150	3	98,56
28	120	20	150	3	98,08
29	120	20	150	3	98,05

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + e \tag{I.2}$$

Sachant que :

Y= est la réponse. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation. x_i = représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur. a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} = sont les coefficients du modèle mathématique.

I.2. Résultat et discussion

Au cours de cette étude nous avons utilisé le plan d'expériences de Box-Behnken pour mettre en œuvre la méthodologie des surfaces de réponses qui nous a permis de déterminer des relations polynomiales du second degré entre les variables d'entrée, et les réponses de sortie. Après l'analyse des données, regroupe le tableau (I.3) les valeurs observées comparées aux valeurs prédites pour la réponse étudiée.

Tableau I.3 : Résultats observés et prédites

N ^o	Turbidité	AJUSTEES	RESIDUELLE
1	98,20	97,8080	0,391993
2	96,75	96,5130	0,236993
3	97,25	96,8580	0,391993
4	97,62	97,3830	0,236993
5	98,37	98,1387	0,231295
6	93,88	93,5920	0,287962
7	98,16	98,2137	-0,053705
8	96,87	96,8670	0,002962
9	94,07	94,3541	-0,284122
10	96,10	96,2641	-0,164122
11	98,42	98,3241	0,095878
12	95,86	95,6441	0,215878
13	99,31	99,1901	0,119910
14	99,20	99,1501	0,049910
15	96,70	96,2434	0,456577
16	96,23	96,2034	0,026577
17	96,23	96,4212	-0,191205
18	98,88	99,0362	-0,156205
19	96,07	96,4745	-0,404538
20	92,72	93,0895	-0,369538
21	96,53	96,7705	-0,240507
22	96,90	96,7305	0,169493
23	98,27	98,4455	-0,175507
24	98,32	98,4055	-0,085507
25	99,02	98,5819	0,438108
26	98,41	98,5819	-0,171892
27	98,56	98,5819	-0,021892
28	98,08	98,5819	-0,501892
29	98,05	98,5819	-0,531892

I.2.1. Analyse des variances (ANOVA)

La qualité de l'ajustement du modèle polynomial quadratique a été exprimée par le coefficient de détermination (R^2), qui est un résultat clé des analyses de régression. Pour un bon ajustement d'un modèle, le coefficient de corrélation doit être au minimum de 0,80. Une valeur R^2 élevée illustre une bonne concordance entre les résultats calculés et observés dans la plage de l'expérience (Abu Amr 2014).

Tableau I. 4 : Analyse de la variance

S	R^2	$R^2(\text{ajust})$	Presse	$R^2(\text{pré})$	AIC	BIC
0,359008	97,07%	95,18%	7,29833	90,26%	57,66	51,17

Les résultats de l'analyse de la variance sont montrés dans Le tableau (I 4). On remarque que les valeurs des coefficients de détermination $R^2=97,07\%$, $R^2_{\text{Adj}}=95,18\%$ et $R^2_{\text{prév}}=90,26\%$ sont élevé et dépassent les 85%. Sachant que, plus la valeur de R^2 est élevée, plus le modèle est parfait. -D'autre part, on a trouvé des bon résultats pour $AIC_C=57,66\%$, $BIC=51,17\% < 85\%$ et $S=0,35 < 1$. Plus ces paramètres sont faible plus notre est parfait.

I.2.2. Valeur de P

Les valeurs de P sont présentées dans le tableau (I.5) pour chaque terme. La valeur P ou la valeur de probabilité est une méthode statistique pour l'inadéquation de l'ajustement et évaluer la signification des paramètres. Les valeurs P inférieures à 0,05 sont supposées être significatives, les termes supérieur à 0,05 n'est pas significatif (Bouzaouit, 2016). Nous avons utilisé comme indicateur statistique les valeurs de P pour évaluer quels sont les termes du modèle qui sont importants. D'après l'ANOVA (tableau I.5), la valeur $P=0,000$ indique que le modèle est significatif. D'autre part, l'ensemble des effets linéaires avec la valeur de $P = 0,000 (< 0,05)$ indique qu'il existe un effet linéaire significatif pour les facteurs principaux (ST, AgS) sauf pour $AgT=0,681(> 0,05)$,Il n'y a donc pas d'effet significatif . La conversion varie donc selon les termes linéaires. Pour les effets quadratiques, on a obtenu des valeurs de $P > 0,05$:pour $AgT \cdot AgT=0,072$. Il s'ensuit en fonction de la valeur de P qu'il n'y a pas d'effet significatif pour le carré de temps d'agitation. D'après l'analyse de la variance, les valeurs de P obtenues pour les interactions, l'ensemble des effets $P = 0,000 (< 0,05)$ indique qu'il existe un effet d'interactions significatif.

L'analyse ANOVA montre également l'inadéquation d'ajustement (LOF) du résultat du test, qui peut être utilisé pour étudier la suffisance du modèle. La valeur F de l'inadéquation d'ajustement de 0,68 implique que l'inadéquation d'ajustement n'est pas significative par rapport à l'erreur pure.

Tableau I.5 : présentée la valeur de P

Source	Valeur de p
Modèle	0,000
Linéaires	0,000
S T	0,050
Ag T	0,681
Ag S	0,000
CEMO	0,000
Carré	0,000
S T*S T	0,000
Ag T*Ag T	0,072
Ag S*Ag S	0,000
CEMO*CEMO	0,000
Interaction à 2 facteurs	0,000
S T*Ag T	0,009
S T*Ag S	0,000
S T*CEMO	0,000
Ag S*CEMO	0,000
Erreur	
Inadéquation de l'ajustement	0,711
Erreur pure	
Total	

-Après élimination l'effet non significatif (le terme Ag T*Ag T) le tableau est le suivant tableau (I.6) :

Tableau I.6: présentée la valeur de P après l'élimination de la turbidité des eaux usées

Source	Valeur de p
Modèle	0,000
Linéaires	0,000
S T	0,081
Ag T	0,849
Ag S	0,000
CEMO	0,000
Carré	0,000
S T*S T	0,000
Ag S*Ag S	0,000
CEMO*CEMO	0,000
Interaction à 2 facteurs	0,000
S T*Ag T	0,021
S T*Ag S	0,000
S T*CEMO	0,000
Ag S*CEMO	0,000
Erreur	
Inadéquation de l'ajustement	0,685
Erreur pure	
Total	

Tous les paramètres estimés pour ce modèle sont significatifs avec $p < 0,05$ (tableau I.6). L'équation du rendement d'élimination de la turbidité des eaux usées optimale pour le nouveau modèle s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned}
 \text{Turbidité} = & 40,40 + 0,6124 \text{ S T} - 0,1840 \text{ Ag T} + 0,1487 \text{ Ag S} + 8,99 \text{ CEMO} - 0,001602 \text{ S T*S T} \\
 & - 0,000354 \text{ Ag S*Ag S} - 0,994 \text{ CEMO*CEMO} + 0,001517 \text{ S T*Ag T} - 0,001000 \text{ S T*Ag S} \\
 & - 0,03825 \text{ S T*CEMO} + 0,01600 \text{ Ag S*CEMO}
 \end{aligned} \tag{I,3}$$

I.2.3. Analyse statistique des résultats

Le graphique de Pareto a une lecture et une organisation très claires aux valeurs absolues des effets standardisés du plus grand effet au plus petit effet, le diagramme comprend également une ligne de référence en rouge afin d'indiquer les effets statistiquement significatifs. la ligne de référence dépend du seuil de signification (noté α ou alpha). Ces les barres des facteurs coupent la ligne de α sont significatif, La longueur de chaque barre est proportionnelle à l'effet standardisé, qui est égal à l'effet estimé diviser par son erreur-type les barres qui ne dépasse pas la ligne α , sont non significatif d'où la nécessité d'éliminer. (Sandrine, 2004 et Bouzaouit 2016)

Dans le diagramme de Pareto, 11 effets sont significatifs : C, AA, AC, D, DD, AD, CC, CD, AB, A, BB, croisé avec la ligne de référence à 1,75. Ces facteurs sont statistiquement significatifs. Mais le facteur résiduel B est sous la ligne de α , on ne peut pas le supprimer parce qu'il est un facteur principale (effet linéaire).

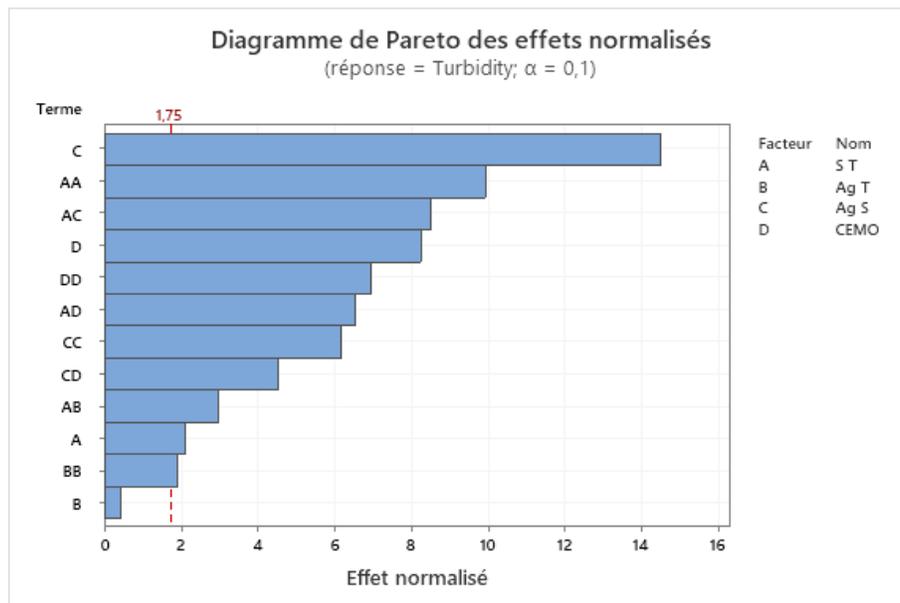


Figure I.1: diagramme de Pareto pour la turbidité

Les points répartis le long de la ligne droite sans aucun transfert de réponse apparaissent comme une courbe de distribution normale des résidus. La droite de Henry affichant les effets négatifs sur le côté

gauche du graphique et les effets positifs sur le côté droit, on utilise ce diagramme des effets pour déterminer la valeur significatif et non significatif, on remarque que les effets en rouge sont d'effet significatif et les effets en bleu ce sont des effets non significatif on va les supprimer de notre model, dans notre figure (I,2) nous pouvons remarquer que tous les facteurs sont statistiquement significatifs. Mais l'effet non significatif de notre modèle est le terme B alors on ne peut pas le supprimer, parce que elle est important. Donc ce diagramme resté le même.

Les points D, AB, CD ont un effet positif, l'augmentation du la concentration de MO (D) et l'interaction AB, CD conduit à l'augmentation du taux d'élimination de la turbidité, En fait, C, AA, AC, DD, CC, AD, A ont des effets négatifs.

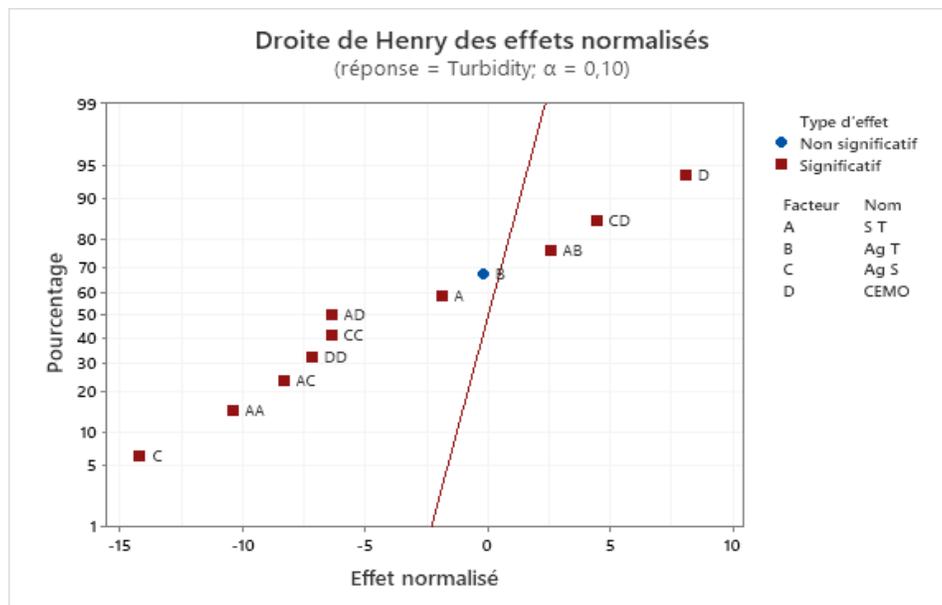


Figure I.2: Droite de Henry des effets normalisés

Le graphique de probabilité normale des résidus pour vérifier si les valeurs résidus sont normalement distribuées. Si les points forment une ligne à peu près droite, cela signifie que les valeurs résiduelles sont réparties normalement.(Ricco,2011)

Le schéma suivant Figura I.3 : indiquent que les valeurs résiduelles forment une ligne droite presque identique à la ligne droite. ce qui indique que la prédiction du modèle est précise..

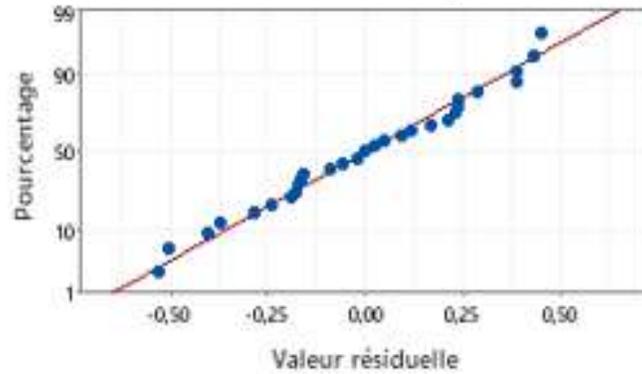


Figure I.3 : Diagramme de probabilité normale

Un graphique résiduel montre l'écart des valeurs prévues par rapport aux valeurs observées. Les valeurs résiduelles (axe vertical) sont les différences entre les valeurs expérimentales et les valeurs ajustées et elles sont utilisées pour évaluer l'adéquation du modèle. Les résidus devraient normalement être distribués au hasard et ont une variance constante. Le graphique des valeurs résiduelles par rapport aux valeurs ajustées de la figure (I.4) montre que tous les points se situaient entre -0,5 et 0,5 et ne contiennent aucune valeur aberrant, ce qui indique que les résidus sont indépendants (Tawfik 2018).

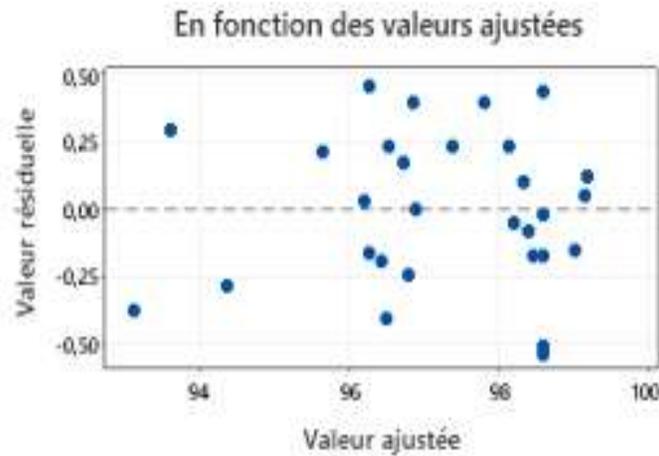


Figure I.4: présenté les valeurs ajustée

I.2.4. Analyses graphique : Les graphiques des effets principaux (Figure I,5) indiquent l'influence de tous les facteurs est comment influe sur la caractéristique de réponse. On conclus de ce diagramme que le temps de stabilisation, La vitesse d'agitation et la concentration d'extrait de graines de Moringa Oleifera sont les facteurs les plus influents sur le taux d'élimination de la turbidité, le sens de la variation est le même à propos de la réponse, c'est-à-dire, lorsque le temps de stabilisation ,la vitesse

d'agitation et la concentration d'extrait de graines de Moringa Oleifera augmentent, le taux d'élimination augmente. le temps d'agitation pas significat affecte sur le taux.

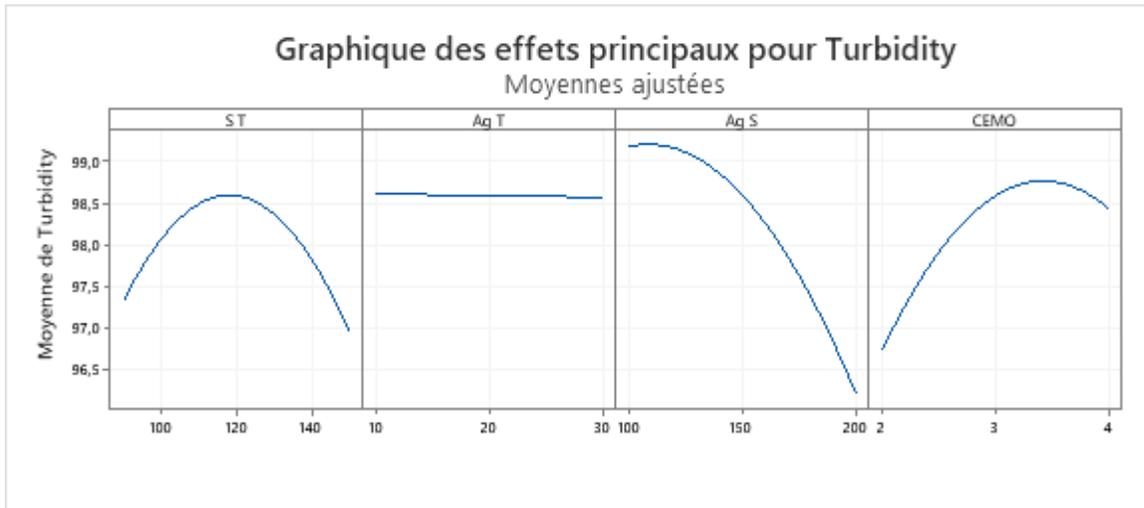


Figure I.5: Graphique des effets principaux pour la turbidité

Le graphique d'interaction montre la meilleure valeur de l'interaction qui contribue à une meilleure valeur. Cette interaction se traduit sur un diagramme (figure I.6), les diagrammes suivant montre des lignes, plus la différence de pente est grande entre les lignes, plus le degré d'interaction est élevé (Bouzaouit 2016 ;François. 2007).

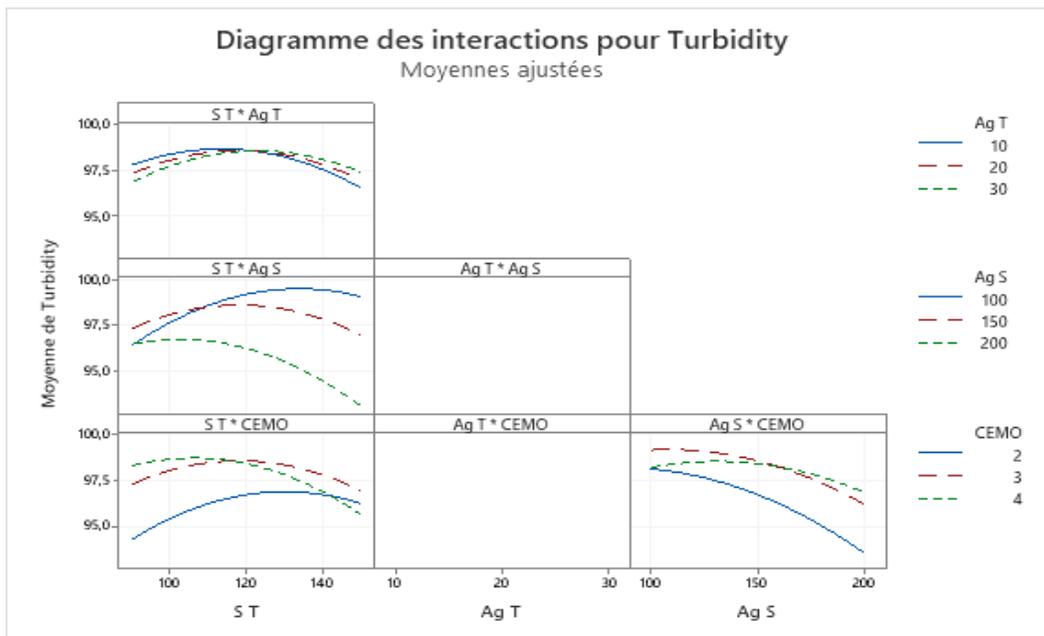


Figure I.6: Diagramme des interactions pour turbidité

Le graphique de contour pourrait nous donner la meilleure zone de rendement. Selon la Figure (I.7), le taux diminue chaque fois que la couleur devient plus claire jusqu'à devienne verte clair là où le rendement est trop faible, la zone verte foncée représente 98,5% de taux d'élimination, ce qui montre que lorsque le temps de stabilisation est entre 110 min, et 120, nous obtenons le meilleur taux d'élimination de turbidité

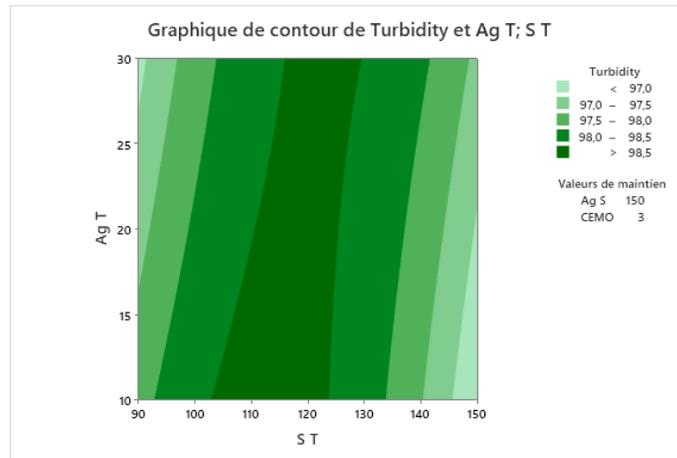


Figure I.7 : Graphique de contour courbe iso-réponse

La figure I.8 a été utilisée pour vérifier s'il y a un maximum de dépollution de la turbidité présenté sous forme de courbure 3D. Ce qui est le cas pour les six figures de surface de réponse (Figure I.8), ce qui montre que le modèle de deuxième degré développé dans notre étude est le bon choix.

Cette figure représente l'interaction entre deux facteurs. Par exemple le temps de stabilisation et la vitesse d'agitation. Sachant que la zone blanche représente la valeur optimale pour ces deux facteurs.

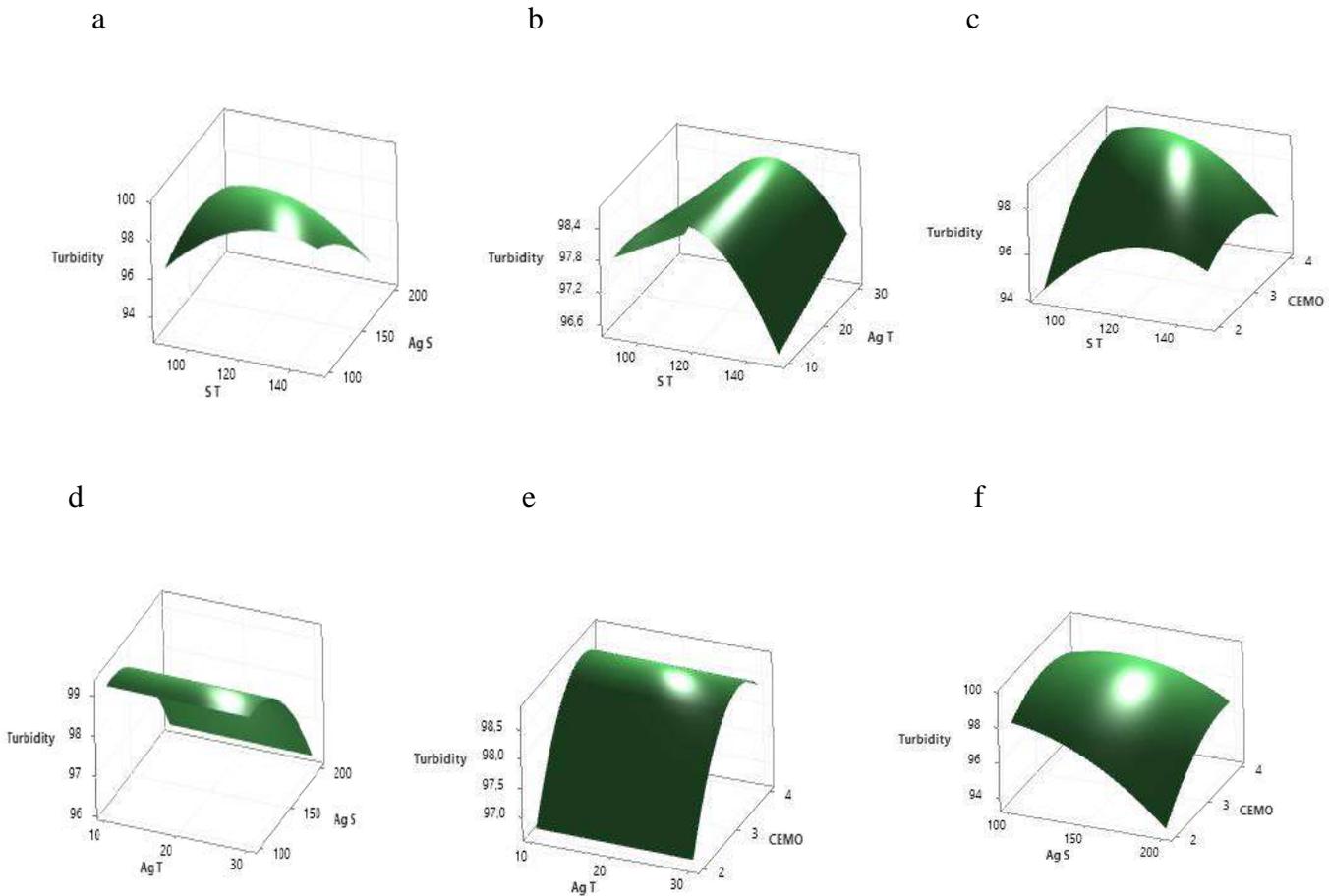


Figure I.8 : Diagramme de surface en 3D pour la turbidité

I.2.5. Optimisation et validation des résultats

Dans cette étape, l'optimisation du taux d'élimination de la turbidité en utilisant l'optimiseur de réponse du logiciel Minitab 19. En exécutant le programme d'optimisation, le taux maximum de élimination obtenu était de 99,83%. La figure I.9 montre les résultats de l'optimisation, le taux d'élimination, afin de définir l'ensemble des facteur expérimentaux qui optimise la réponses de façon simultanément (Lessoued et al, 2017) les conditions optimales ont été obtenues sont: temps de stabilisation=143,33min , temps d'agitation=30min, vitesse d'agitation= 100, les graines de Moringa Oleifera= 2,56g/l. Avec une valeur de la désirabilité pour la turbidité égale à 1.

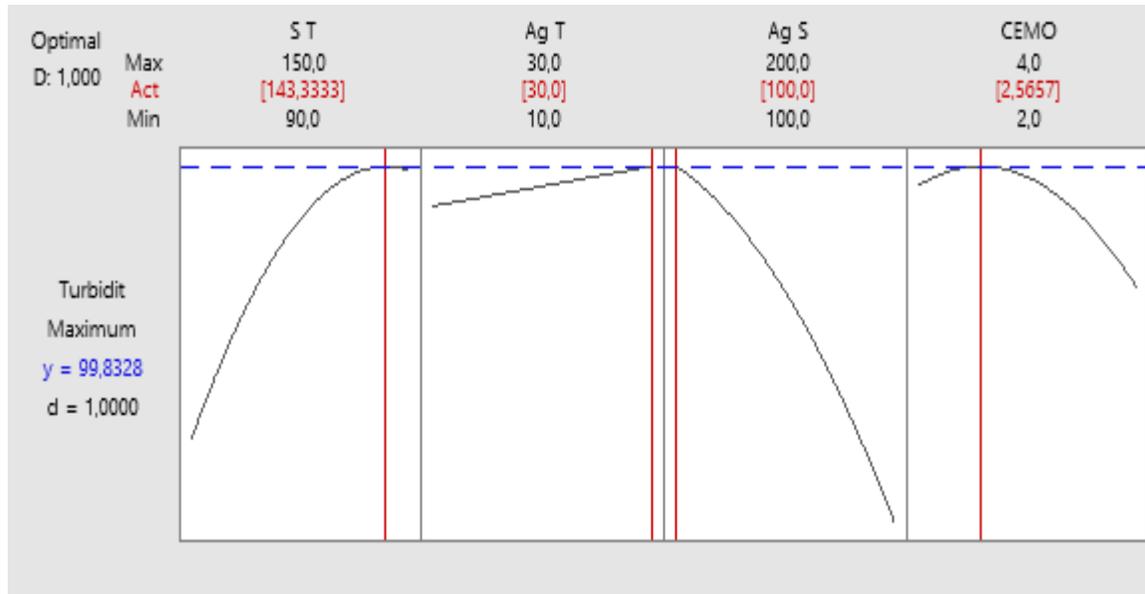


Figure I.9: courbe d'optimisation

I.3. Comparaison des résultats

Le tableau I.7 illustre une comparaison de notre résultats avec d'autres travaux de recherches travaillaient sur le même sujet, pour montrer l'intérêt de nos résultats. Nous pouvons clairement remarquer que les coefficients de variation de prédiction ont augmenté par rapport à ce que c'était, de plus le taux d'élimination de la turbidité a été amélioré à 99,83%. Ce qui prouve la fiabilité de notre modèle dans la prédiction de taux d'élimination de la turbidité.

Tableau I.7 : comparaison des résultats

	Résultat de Olusola et al, 2019	Présente étude
Modèle	0,0001	0,0000
R ²	90	97,07
R ² .Adj	80	95,18
LOF	0,0704	0,68
Temps de stabilisation	120 min	143,33 min
temps d'agitation	10 min	30 min
vitesse d'agitation	100 rpm	100 rpm
la concentration d'extrait de MO	3 g/l	2,56 g/l
La turbidité éliminée	99, 31%	99,83%

Chapitre II

A thick red line with rounded ends, starting from the left side of the page, curving upwards, then extending horizontally to the right, and finally curving downwards to end on the left side, framing the title below.

Travail expérimental

II.1.Présentation de la station

Notre travail a été effectué à la ville de Touggourt, c'est une Daïra de la wilaya d'Ouargla, située à 160 km au nord-est d'Ouargla, à 225 km au sud de Biskra et à 600 km environ au sud-est d'Alger. La ville de Touggourt est une oasis du nord du Sahara algérien, et elle est la plus grande ville de la région d'Oued Righ, son territoire s'étend sur les consistances territoriales suivantes : Tebesbest, Nezla ,Zaouia Al Abidia et Touggourt (Amir 2020).

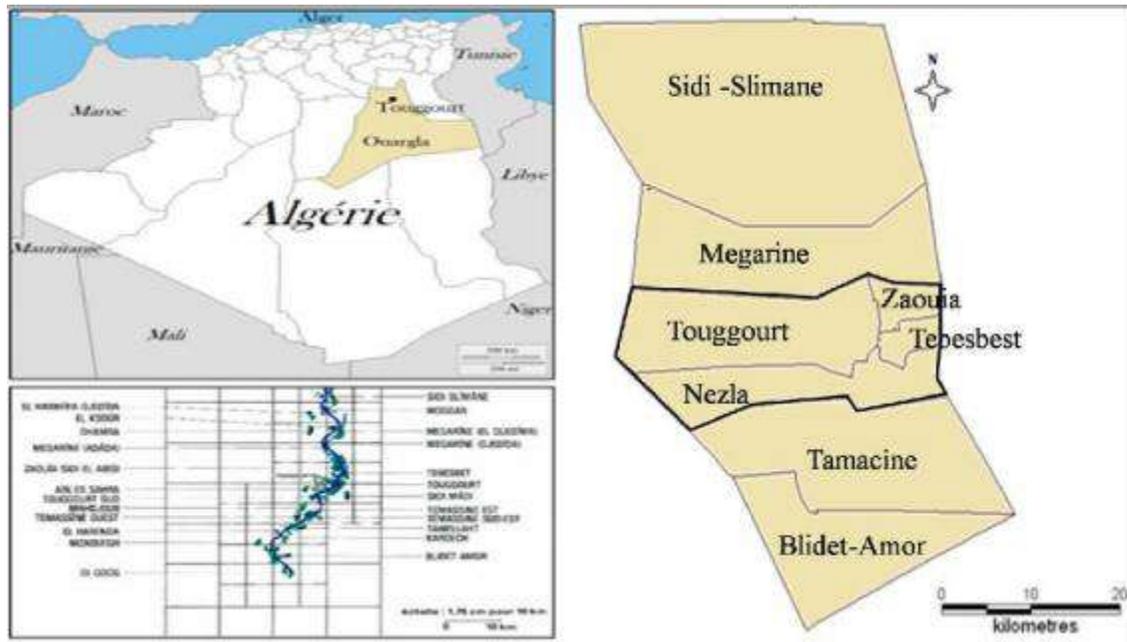


Figure II.1 : Situation géographique de la région de Touggourt

La station d'épuration est équipée pour accueillir 62 500 équivalents / habitants, soit environ 33% de la population d'environ 180 000 habitants pour les quatre principales communes de Touggourt. , Où environ 67% de la quantité produite est évacuée non traitée via les stations d'évacuation Wade Reg (Bachirb 2012).

L'eau usée dans la ville de Touggourt, Se compose de plusieurs sources :

- les eaux domestiques.
- les eaux industriels (stations de lavage –petites unités d'agro-alimentaires....etc.).
- les eaux des pluies.
- les rejets des hôpitaux.

II.2.Le prélèvement

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté ; il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, (Houasni ;Bensmaili 2019) nous devons déterminer la quantité à partir de laquelle prélever des échantillons (le volume requis pour effectuer les analyses est de 5 litres). Les échantillons sont ensuite placés dans des emballages stériles et scellés. Les conteneurs doivent être complètement remplis sans déplacer l'eau pour éviter le plus grand contact possible avec l'air. Les échantillons sont conservés dans une glacière à basse température (4 ° C) dans un temps ne dépassant pas les 24 heures, et ils seront transférés au laboratoire. Nous effectuons le prélèvement à l'entrée des bassins. Voir la figure12 :



Figure II.2 : photo représentant des points de prélèvement.

Les paramètres ont été mesurés dans laboratoire du l'ONA de Touggourt : Température, conductivité, salinité et pH et la MES, NH_4^+ , NO_2^- . Les appareillages qui ont été utilisés au cours de notre travail consignés dans le tableau suivant :

Tableau II.1: Paramètres de qualité et leurs appareils de mesure.

Paramètres	Appareil de mesure
Température	Multi paramètre 350 i WTW
pH	Multi paramètre 350 i WTW
Conductivité	Multi paramètre 350 i WTW
Salinité	Multi paramètre 350 i WTW
O2 dissous	Multi paramètre 350 i WTW
MES	Centrifugeuse ROTOFIX 32 A
RS	Etuve 105 °C
Turbidité	Turbidimétrie 555 IR
L'humidité	dessiccateur

II.3. Préparation des graines de Moringa Oleifera

Les graines de MO ont été retirées des gousses, séchées à température ambiante pendant 1 jour, et broyées en poudre fine à l'aide d'un broyeur domestique. Les poudres fines ont ensuite été tamisées à travers une maille de 2 mm ou de 1 mm. la poudre attire fortement l'humidité et le produit peut réabsorber l'humidité pendant ou après le broyage. Par conséquent, la poudre de graines sera séchée à 50 °C pendant 30 minutes dans l'étuve pour réduire la teneur en humidité. Après séchage, la poudre de graines de MO a été laissée à refroidir dans le dessiccateur, et emballé dans des sacs propre et scellé. Les sacs ont été conservés au réfrigérateur à 4 °C ,afin de maintenir la fraîcheur et la sécheresse pour une utilisation ultérieure.



Figure II.3 : Méthode de préparation de la Moringa Oleifera

II.4. Méthode

Dans ce travail, on a appliqué un plan d'expériences pour étudier la purification de l'eau usée, par le procédé coagulation-floculation, dans le but de définir la meilleure expérience, pour ce traitement, on utilise la matrice d'expérience qui est représentée dans la figure ci-dessous, qui est extraite d'un logiciel de plan d'expérience. De chaque expérience on prélève 500ml de l'eau usée pour l'appliquer.

Tableau II.2: présente la matrice d'expérience

N	PH	m (g)	T
1	6,4054	1,09322	16,0809
2	7,5960	1,09322	16,0809
3	6,4054	4,00678	16,0809
4	7,5940	4,00687	16,0809
5	6,4054	1,09322	33,9191
6	7,5940	1,09322	33,9191
7	6,4054	4,00678	33,9191
8	7,5940	4,00678	33,9191
9	6,0000	2,55000	25,0000
10	8,0000	2,55000	25,0000
11	7,0000	0,10000	25,0000
12	7,0000	5,00000	25,0000
13	7,0000	2,55000	10,0000
14	7,0000	2,55000	40,0000
15	7,0000	2,55000	25,0000
16	7,0000	2,55000	25,0000
17	7,0000	2,55000	25,0000
18	7,0000	2,55000	25,0000
19	7,0000	2,55000	25,0000
20	7,0000	2,55000	25,0000

Avant de commencer les expériences, nous pesons la poudre de MO pour chaque expérience en utilisant une balance électrique (figure 14), et ajuster le degré de PH par NaOH, HCL (le degré de PH à l'entrée de la station = 7,10).

Dans l'expérience 2,4,6,8,10 on ajoute NaOH pour élever le PH, par contre pour les autres expériences on ajoute HCL pour diminuer le PH.



Figure II.4 : balance électrique

Jar-test :

Le jar-test est la méthode la plus ancienne et la plus utilisée pour plus de 50 ans, le Jar-Test est la technique standard la plus utilisée pour optimiser l'addition de coagulants et de floculant dans le domaine du traitement de l'eau.

Une série de 4 à 6 béchers remplis d'eau à traiter et on ajoute à chacun d'entre eux une dose croissante de coagulante et on les agitent pendant un certain temps et vitesse (Cherif 2012).



Figure II.5: le jar-test

Dans notre travail, nous avons placé des béchers remplis chacun de 500 mL d'eau usée brute et une quantité variables de poudre de grains de MO à analyser dans le flocculateur sous agitation rapide (250 tours/min) pendant 3 min , puis nous avons diminué l'agitation à 40 tours/s pendant [10 , 40]min ça dépend du tableau 03 .

II.4.1. Matériels d'analyse physicochimique des eaux

La PH : Le pH mesure la concentration en ion H^+ de l'eau, il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14 ; 7 étant le pH neutralité (Kane 2017).

La conductivité / salinité

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau (Kane 2017).

La température

La température doit être mesurée in situ. Les appareils de mesure de la conductivité ou, de PH possèdent généralement un thermomètre intégré (Cherif 2018).

O₂ dissous

O₂ dissous mesure la concentration et la saturation en oxygène dissous dans l'eau



Figure II.6 : Multi-paramètre (PH ,O₂,T ,La conductivité , salinité).

La turbidité

La mesure de la turbidité permet de déterminer la qualité de l'eau. La clarté et la transparence de celle-ci sont l'image d'une haute qualité (Mediatrice 2012).



Figure II.7 : turbidité mètre

MES :

En Utilisant le centrifugeuse de laboratoire équipée de godets de 100 mL gradués. Remplir chaque godet de 80mL d'eau et centrifuger à 2000 t / min pendant 10 minutes. En fin d'opération, éliminer le surnageant et récupérer soigneusement tous les culots de boue qui on été laisse sécher à l'étuve à 105 °C. La différence entre la masse initiale et la masse finale du filtre donne la concentration en MES. La conversion entre la masse et la concentration en MES est donné par l'Equation (Mediatrice 2012):

$$MES = \frac{mf - mi}{v} \quad (II.1)$$



Figure II.8 : centrifugeuse



Figure II.9 : étuve



Conclusion générale

Conclusion

Pour définir le modèle adéquat dans ce travail et améliorer la réduction de la turbidité (Réponse) de l'eau usée, par coagulation – floculation, par rapport aux résultats trouvés dans la référence (Olusola et al, 2019), nous avons appliqué la méthodologie de surface de réponse avec le plan Box Benhken.

Après avoir mené plusieurs expériences, il a été prouvé que le temps de stabilité et la concentration de Moringa Oliveira et la vitesse d'induction sont des facteurs affectant l'élimination du plus grand pourcentage de la turbidité, car cette étude a montré que les conditions expérimentales idéales pour ce processus sont : Le temps de stabilisation (143,3 min), le temps d'agitation (30 min), la vitesse d'agitation (100 tr / min) et la concentration de Moringa sont de (25 g / l). Nous avons obtenu des résultats meilleurs et satisfaisants pour le coefficient de détermination R^2 (97,07%), R^2_{ajd} (95,18%) et LOF (0,68) avec un très bon pourcentage de taux d'élimination de la turbidité de 99,83%.

Les résultats obtenus ont montré la possibilité de purifier les eaux usées en utilisant des graines de Moringa oleifera comme coagulant naturel sans aucun effet secondaire, et du point de vue économique, il est moins coûteux par rapport aux produits chimiques habituellement utilisés dans la purification de l'eau.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abu Amr, S.S., Aziz, H.A., Bashir, M.J.K, 2014 Application of response surface methodology (RSM) for optimization of semi-aerobic landfill leachate treatment using ozone, 2014, DOI: 10.1007/s13201-014-0156 .
- Amiri Khaled : contribution a l'évaluation et au traitement des eaux usées dans le sud est du sahara algerien. application au sud de la region d'oued righ (tougourt), Thèse de doctorat, université kasdi merbah, Département des Sciences de la Terre– ouargla ,2020.
- Amjad M.S., Qureshi H., Arshad M., Chaudhari S.K. et Masood M: The incredible queen of green: Nutritive value and therapeutic potential of Moringa oleifera Lam.2015. Journal of Coastal Life Medicine , 3(9): 744-751.
- Angela Ralezo Maevalandy : La Moringa-Moringa Oléifera Antanarivo (Madagascar). 2006.
- Anonyme 2., Le lagunage naturel. Les leçons tirées de 15 ans de prédication en France. Coed. Cemagref. édition. Agence de l'eau. –Bretagne,2006.
- Anwar F., Bhangar M.I., and Kazi T.G: Relationship between rancimat and active oxygen method values at varying temperatures for several oils and fats.2003.Journal of the American Oil Chemists' Society, vol.80 (2), 151-155.
- Asano. Ndabigengesere, K.S. Narasiah,; use of Moringa oleifera seed as a primary coagulant in wastewater treatment environ , 1998, in Scopus full text via cross reciting. Technol., 19, pp. 789–800.
- Attab. SARAH , Amélioration De La Qualité Microbiologique Des Eaux Epurées Par Boues Activées De La Station D'épuration Haoud Berkaoui Ouargla Par L'utilisation D'un Filtre ASableLoca , mémoire magister, université kasdi merbah 2011.
- Bakiri zahir ; Analyse et optimisation des eaux usées urbaines par boues activées : application au décanteur secondaire, thèse doctorat, Université Ferhat Abbas , Génie des Procédés- Sétif-1, 2014 .
- Besse F :L'Arbre du mois – Moringa oleifera Lam.; Le flamboyant – Bulletin de liaison des membres du réseau Arbres tropicaux No 40 ; 5p.
- Beyram T, - Traitement des polluants organiques persistants par décharges à barrières diélectriques (DBD) et par décharges glissantes (Glidarc). Chimie analytique. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie ,2012.
- Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveiraa, E.P., Villar, L.S., Escalera, L.A,2008 response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. 2008. Talanta76(5):965-977. DOI:10.1016/j.talanta.2008.05.019.
- Boukerroucha Sharkawi: Modélisation des stations d'épuration à boues activées : cas de la station de Baraki (Alger) : Thèse de doctorat Hydraulique Agricole Ecole Supérieure d'Agronomie El-Harrach (Alger) 2011.
- Boukary Sawadogo :Traitement des eaux usées industrielles par des procédés membranaires sous climat sahélien : cas des eaux usées de brasserie au Burkina Faso. Génie des procédés. Université Montpellier; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, 2018. Français.
- Bouzaouit Nadia : Optimisation de la synthèse enzymatique d'esters de sucres par la méthodologie des plans d'expériences. 145p. Thèse de doctorat: Chimie organique, Université Annaba ;2016.
- Cherif Lamia : Etude comparative sur le prétraitement des eaux saumâtre par la coagulation-floculation-décantation et l'ultrafiltration; Thèse de doctorat , Université Abou Beker Belkaid , Département Hydraulique science de l'eau ,Tlemcen , 2018.
- Costa R.A, de Sousa O. V, Hofer E, Mafezoli J, Barbosa F. G et dos Fern an des Vieira R. H. S: Thio carbonates from Moringa oleifera Seeds Bioactive against Virulent and Multidrug-Resistant Vibrio Species Hindawi Bio Med Research International .2017, 6 pages, Brazil, ID 7963747.
- Dalla R K.R :program director for the pacific, nfta, agro-forestry species high lights a publication of the agro-forestry information service 1010 holomua road, paia ,hawaii 96779-6744 us a April 1993.

- Dhakar R. C, Maurya S. D, Pooniya B. K, Bairwa N, et Gupta M: Moringa :The herbal gold to combat malnutrition. *Chronicles of Young Scientists*.2011,DOI:10.4103/2229-5186.90887.
- Diouf :diop m, lo c; drame ka, senee, baco, gueye m, fayeb.prospectiondelégumes feuilles traditionnels de type africain au sénégal. Roma. italie.1999 . p: 11-150
- Djeddou Messaoud: prévision du taux d'échec avec les réseaux neurones artificiels dans une station de traitement des eaux résiduaires , thèse de doctorat ,Hydraulique ,université Mohamed khider biskra, 2014.
- Eilert U., W. B:the antibiotic principle of seeds of Moringa oleifera and moringastenopetala.1981.*Planta medica* 42: 55–61.
- Erwan carré , qualité biologique des eaux usées traitées en vue de la réutilisation , Université de Lyon , Français ,2017 .
- Fahey, J. W. Moringa oleifera: a review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties. 2005.Part 1. *Trees for life Journal*, 1(5), 1-15.
- Foidl N., Makkar H.P.S., Becker K : Potentiel de Moringa oleifera en Agriculture et dans l'Industrie, Potentiel de développement des produits du Moringa 29 octobre- 2 novembre2001, Dar es Salaam, Tanzani.
- François Rabier Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire, thèse doctorat, Génie mécanique, institut national polytechnique de toulouse, 2007
- Fuglie, Lowell J, Ed. The Miracle Tree 2:moringaoleifera: natural nutrition forthe tropics. Training manual. l'arbre miracle. Church world service, dakar, senegal.2001.
- Gaëtan Blondet : Système à base de connaissances pour le processus de plan d'expériences numériques. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur de l'UTC. université de Technologie de Compiègne.2017.
- Goupy J Creighton Lee (2006) ; Introduction aux plans d'expériences, les mélanges, Dunod, Paris, 2001, 2006,304 p.
- Goupy J. "Pratiquer les plans d'expériences", Dunod. Paris, 2005.
- Hêdji C.C., Diane N.S. Kpoguè G., Marcel R. Houinato et Emile D. Fi :Valorisation de Azollasp, Moringa oleifera, son de riz, et de coproduits de volaille et de poisson en alimentation animale: synthèse bibliographique .2014,*Journal of Applied Biosciences* 81: 7277 –7289.
- Haldar R, Kosankar. S: Moringa oleifera: The Miracle Tree. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, Inde 2017.
- Hernández de leon H.R: Supervision et diagnostic des procédés de production de lé eau potable, Mémoire pour l'obtention de diplôme de Docteur de l'institut National des Sciences Appliquées de toulouse ,;2006 .
- Iboukhouléf Hamida :Traitement des margines des huileries d'olive par les procédés d'oxydation avancée basés sur le système Fenton-like (H2O2/Cu) . Thèse de doctorat : Chimie des matériaux. université mouloud mammeri, tizi-ouzou. 2014.
- James A , Zikankuba. V:Moringaoleifera a potential tree for nutrition security in sub-Sahara Africa;2017. *American Journal of Research Communication*, 5(4): 1-14 ISSN: 2325-4076.
- Khaoulani Sohayb : Traitement d'eaux usées par adsorption sur des polymères de cyclodextrine et développement de capteurs chimiques à base de membranes de verres de chalcogénures destinées à la détection des ions Hg²⁺,Thèse de doctorat en Chimie. Chimie environnementale ,Université du Littoral Côte d'Opale ; Français,2015 .
- Kimouche, Karima : Etude de quelques plans d'expériences associées aux surfaces de réponse . Thèse de doctorat. université mentouri Constantine; 2008.
- Laabassi Aayche , l'épuration des eaux usées par le système de lagunage à macrophytes ,thèse doctorat ,université ferhat abbas, Département d'Agronomie, sétif1 ;2016.
- Laleye O.A.F., Ahissou H., OlounladeAp., Azando E V B., Laleye A :Etude bibliographique de trois plantes antidiabétiques de la flore béninoise: Khayasen egalensis(Desr) A. Juss (Meliaceae),

- Momordicacharantia Linn (Cucurbitaceae) et Moringa oleifera Lam (Moringaceae) ;2015. International Journal of Biological and Chemical Sciences. 9(5): 2682-2700.
- Leone A, Spada A, Battezzati A, Schiraldi A, Aristil J, Bertoli S: Moringa oleifera Seeds and Oil: Characteristics and Uses for Human Health : An overview. Int.J. Mol. Sci, 17, 2141. édition Maurizio Battino université de milan, Italie ; 2016.
- Lessoued Redha : Modélisation et optimisation de la dépollution des lixiviats , Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique , Génie chimique , Algérie, 2018.
- Louni S : Extraction et caractérisation physicochimique de l'huile de graines de Moringa oleifera . Mémoire de Magister , Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach ;2009. 90 p.
- Makkar H., et Becker, K: Nutrients and anti quality factors in different morphological parts of the Moringaoleifera tree.;1997. The Journal of Agricultural Science,128(03), 311-322.
- Malo T : Effet de la fertilisation sur la croissance et la production de Moringa oleifera local et Moringa oleifera PKM-1 dans la Région des Cascades (Burkina Faso). Mémoire de fin de cycle Institut du Développement Rural Université Polytechnique de Bobo –Dioulasso;2014.
- Marie W : Étude d'opportunité du développement de la filière Moringa oleifera dans la région de Toliara, rapport de stage.2015.
- Metahri Mohemmed said, élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. cas de la STEP est de la ville de tizi-ouzou, Thèse de doctorat , université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2012.
- Minitab : http://support.minitab.com/fr-fr/minitab/17/topic_library/modelingstatistics/doe/response-surface-designs/what-is-a-response-surface-design.
- Mokdad Ramdania : Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants . thèse Doctorat en Génie Electrique. Université de 08 Mai 1945 Guelma ;2012.
- Ndabigengesere A., Narasiah K,S: use of Moringa oleifera seed as a primary coagulant in wastewater treatment environ.1998. Technol., 19, pp. 789–800 view record in Scopus full text via cross refciting articles (47).
- Olusola A A , Abdulkareema F , Adeyinka S, Yusuffa , Mayowa L, Akindele O : Response surface methodology y approach to optimization of process parameter for coagulation process of surface water using Moringa oleifera seed , 2019, DOI.org/10.1016/j.sajce.2019.
- Parrotta J. A. P. Dr. : Moringa oleifera LAM., 1785; Enzyklopädie der Holzgewächse, Handbuch und Atlas der Dendrologie : Roloff A., Weisgerber H., Lang U., Stimm B: WILEY-VCH Verlag Gmb H & Co. KGaA, Weinheim; 8p.
- Pham JL : Moringa, dernières nouvelles ;2004. Spore n°106. P. 7.
- Pishgar-Komleh.S.H, A. Keyhani, MR Mostofi-Sarkari et A. Jafari: Application de la méthodologie de surface de réponse pour l'optimisation des pertes de récolte des cueilleurs-décortiqueurs dans les semences de maïs.2012. iran. Iranica Journal of Energy & Environment.
- Ramade F : les polluants de l'environnement et de l'homme» dictionnaire encyclopédique des pollutions ,2000, Edi science international, Paris, 424 p.
- Ravindra C., Joshi B., Vasantharaj D., Rashmi K, A: review of the insect and mite pests of Moringa oleifera Lam. Agriculture for Development; 2016.
- Ricco Rakotoma lala , Techniques empiriques et tests statistiques, 2011, Tests de normalité . Université Lumière Lyon , Version 2.0 p (41).
- Roloff A., Weisgerber H., Lang U., Stimm B; Moringa oleifera Lam., 1785 : Enzyklopädie der Holzgewächse .WILEY-VCH Verlag GmbH &Co. KGaA, Weinheim;2009. ISBN: 978-3-527-32141-4.
- Saini R.K., Sivanesan I., Keum Y: Phytochemicals of Moringa oleifera: a review of the intuitional, therapeutic and industrial significance; 2016. review article, 3 Biotech 6:203,14 p.
- Sandrine Karam, Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt, Thèse de doctorat, Université de Limoges. Faculté des sciences et techniques ; 2004.

- Sébastien Renou : Analyse de cycle de vie appliquée aux systèmes de traitement des eaux usées :. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006. Français. ffNNT : 2006INPL001Nff. fftel-01752508f.
- Séverin F : Plant akpye Bwatèd, Ayiti; Éditions Quitel de Desk Top Advisory; 2002.143p.
- Suriati Binti Ghazali ,Aziz Q, Aziz Zaid ; Preliminary Investigation of Water Treatment Using Moringa Oleifera Seeds Powder as Natural Coagulant: A Case Study of Belat River, Malaysia ;The International Journal of Engineering and Science 2019.ISSN DOI:10.9790/1813-0802017985
- Tawfik A. Saleh, Salawu Omobayo Adio, Asif, H. Dafalla, Response surface optimization and Statistical analysis of phenols adsorption on diethyl lenetramine-modified activated carbon, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.242
- Tinsson, W. Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques, Mathématiques et Applications 67. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010. 14p. DOI: 10.1007/978-3-642-11472-41.
- Viver Stéphane : Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis. Thèse de Doctorat : Génie Electrique .Université des Sciences et Technologies de Lille .2002.
- Wahadame Bouchra. Analyse et optimisation du fonctionnement de plies à combustible par la méthode des plans d'expériences. Thèse de Doctorat. 2006.
- Yusoff. M. M:Aqueousenzymatic extraction of Moringa oleifera oil with high pressure processing pre-treatment, thèse de doctorat en phylosophie, département aliment et sciences alimentaires, université de Reading, Angleterre: 2016.
- Zobeidi Ammar; épuration des eaux usées urbaines par lagunage aéré en zone aride – cas de la région d'el-oued. paramètres influents et choix des conditions optimales, thèse doctora, université kasdimerbah, Génie de procédés- ouargla, 20 /11/2017
- Zongo, Inoussa. Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. Thèse de doctorat , Génie des procédés et des produits , - Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits, Environnement, Nancy, ENSIC: 2009.