



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et  
Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي  
برج بوعريريج

Université Mohamed  
El Bachir El Ibrahimi  
de Bordj Bou Arréridj



Faculté des Sciences et de la Technologie

**Département Génie des procédés**

**Mémoire de fin d'études**

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU

DIPLOME DE : MASTER

**Filière : Génie des Procédés**

**Option : Génie des Procédés de l'environnement**

Thème

**Optimisation du traitement de l'eau cimentaire à l'aide de la méthode des plans  
d'expériences**

Préparé par : Chenouf Zakaria

A. Messis	Président	M.C.A	Université de Bordj BouArréridj
H.FAID	Rapporteur	M.C.B	Université de Bordj BouArréridj
N. Maghraoui	Examineur	M.A.A	Université de Bordj BouArréridj

Année universitaire : 2020 / 2021

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes frères,*

*Pour soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.*

*Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.*

*A mes chères ami (e) s,*

*Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

*A toute ma famille*

Zaki

## Remerciements

En premier lieu et avant tout, je remercie le dieu le tout puissant et le créateur qui m'a aidé à réaliser ce modeste travail; Je témoigne ma profonde gratitude, mes profonds et sincères remerciements à Mme H. FAID mon promoteur pour leur orientation, Leur effort et leur patience fournis durant ce travail ; J'adresse mes vifs remerciements à tous mes professeurs sans exception ;

Je tiens aussi à remercier les personnes qui m'ont donné la chance de continuer mes études, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à élaboration de ce mémoire

Zaki

## ملخص

يتمثل الهدف من هذا العمل في المعالجة الفيزيائية والكيميائية للمياه الملوثة عن طريق تخثر التلبد. هذه الطريقة هي إحدى تقنيات المعالجة المناسبة للحد من تلوث المياه. يتم تحديد القيم التجريبية (درجة الحموضة، الناقلية والعمارة) كدالة لجرعة المادة المخترة وتلك الخاصة بالمادة الندفية.

تم إجراء دراسة إحصائية للنتائج التي تم الحصول عليها للوصول إلى القيم المثلى ، وطبقنا طريقة التصاميم التجريبية باستخدام برنامج JMP 7.0

الكلمات المفتاحية: العلاج ، التخثر - الاندفاع ، المياه الملوثة ، دراسة إحصائية

## Résumé

L'objectif de ce travail consiste au traitement physico-chimique des eaux polluées par coagulation floculation. Cette méthode s'inscrit parmi les techniques de traitement appropriées pour réduire la pollution des eaux. Les valeurs expérimentales (pH, conductivité et la turbidité) sont déterminées en fonction de la dose du coagulant et de celle du floculant. Une étude statistique des résultats obtenus est réalisée pour atteindre aux valeurs optimales, nous avons appliqué la méthode des plans d'expérience à l'aide du logiciel JMP 7.0

**Mots clés :** traitement, coagulation-floculation, eau polluée, étude statistique.

## Abstract

The objective of this work consists in the physico-chemical treatment of polluted water by coagulation flocculation. This method is one of the appropriate treatment techniques to reduce water pollution. The experimental values (pH, conductivity and turbidity) are determined as a function of the dose of the coagulant and that of the flocculant. A statistical study of the results obtained is carried out to reach the optimal values; we applied the method of experimental designs using the JMP 7.0 software.

**Keywords:** treatment, coagulation-flocculation, polluted water, statistical study.

## Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 4

### Chapitre I : Revue Bibliographique

I.1 Introduction ..... 6

I.2 Définition de l'eau ..... 6

I.2.1 Différents types d'eau douce..... **Error! Bookmark not defined.**

I.2.2 Les paramètres physico-chimiques de l'eau..... 7

I.2.3 Les états physiques de l'eau ..... 9

I.2.4 Les propriétés de l'eau ..... 10

I.3 La pollution de l'eau ..... 11

I.3.1 Selon la répartition géographique..... 11

I.3.2 En fonction de l'origine de la pollution..... 12

I.3.3 La pollution par les hydrocarbures (ou pollution pétrolière) ..... 13

I.3.4 Selon la nature des polluants..... 13

I.3.5 La pollution microbiologique, biologique et bactériologique..... 14

I.4 Rôle de la coagulation-floculation..... 14

I.4.1 Mécanisme de la coagulation floculation ..... 15

I.4.2 Suspensions colloïdales ..... 15

I.4.3 Facteurs influençant la coagulation-floculation ..... 18

a) Effets du pH ..... 18

b) Effet de la dose de coagulant ..... 18

c) Effet de la vitesse d'agitation ..... 18

I.3.4 Les coagulants..... 19

	<b>-Les coagulants minéraux.....</b>	<b>19</b>
<b>I.3.5</b>	<b>Les flocculant.....</b>	<b>19</b>
	<b>a) Les flocculats organiques .....</b>	<b>19</b>
	<b>b) Les flocculant de type polymères (poly électrolytes) synthétiques.....</b>	<b>19</b>
	<b>c) Les flocculants minéraux.....</b>	<b>19</b>
	<b>d) Autres adjuvants minéraux .....</b>	<b>20</b>
 <b>Chapitre II : Techniques Expérimentales</b>		
<b>II.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.</b>	<b>Les paramètres de l'eau avant le Traitement.....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.1</b>	<b>L'échantillonnage.....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.2</b>	<b>Principe de Jar-test.....</b>	<b>22</b>
	<b>1. Protocole .....</b>	<b>23</b>
	<b>2.1 Mesure de la turbidité .....</b>	<b>24</b>
	<b>2.2 Mesure de la conductivité.....</b>	<b>24</b>
	<b>2.3 Mesure du pH.....</b>	<b>25</b>
<b>II.3</b>	<b>Méthode de plan d'expérience.....</b>	<b>26</b>
<b>II.3.1</b>	<b>Terminologie.....</b>	<b>26</b>
<b>II.3.2</b>	<b>Plan de surfaces et de réponse (RSM) .....</b>	<b>28</b>
<b>II.3.3</b>	<b>Plans de Box-Behnken.....</b>	<b>29</b>
<b>II.3.4</b>	<b>Modèle mathématique postulé .....</b>	<b>29</b>
<b>II.3.5</b>	<b>Principaux avantages des plans d'expériences .....</b>	<b>29</b>
<b>II.4</b>	<b>Méthode des surfaces de réponse (M.S.R) : principes et définitions .....</b>	<b>30</b>
<b>IV.5</b>	<b>Introduction au logiciel JMP : .....</b>	<b>31</b>
<b>IV.6</b>	<b>Mise en application des plans d'expériences .....</b>	<b>31</b>
<b>IV.7</b>	<b>Analyse de la variance .....</b>	<b>32</b>
<b>IV.8</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>).....</b>	<b>32</b>

## **Chapitre III : Résultats et discussions**

<b>III. Introduction</b> .....	35
<b>III.2 Traitement par coagulation -floculation</b> .....	35
<b>III.3 Plan d'expérience</b> .....	35
<b>III.3.1 Détermination des facteurs</b> .....	35
<b>III.3.2 Analyse statistique des résultats</b> .....	36
<b>III.3.3 Analyse de la variance (ANOVA)</b> .....	36
<b>1) Réponse pH</b> .....	37
<b>a) Les surfaces de réponses et les courbes iso-réponse</b> .....	39
<b>b) Etude des interactions</b> .....	39
<b>c) Optimisation</b> .....	40
<b>2) Réponse Turbidité</b> .....	42
<b>Conclusion générale</b> .....	46
<b>Références</b> .....	47

## Liste des abréviations

MES : Matière En Suspension

OMS : Organisation Mondial de la Santé

FeCl<sub>3</sub> : Chlorure ferrique

L'OMS : Organisation mondiale de la santé

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> : Sulfate d'aluminium

FeSO<sub>4</sub> : Sulfate ferreux

M.S.R : Méthode de Surface de Réponse

ANOVA : Analyse de la variance



## Liste des figures

Figure I. 1 :La particule d'eau [3].....	6
Figure I. 2 : Les différentes dispositions des molécules d'eau dans ses trois états [15].....	10
Figure I. 3 : Double couche d'une partie colloïdale .....	16
Figure I. 4 : Potentiel zêta.....	17
Figure II. 1 :Jar-test.....	23
Figure II. 2 : Turbidimètre .....	24
Figure II. 3 : Conductimètre.....	25
Figure II. 4 :PH-mètre .....	26
Figure II. 5 : Domaine du facteur.....	27
Figure II. 6 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	27
Figure II. 7 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse.....	28
Figure II. 8 : Plan de Box- Behnken pour trois facteurs.....	29
Figure II. 9 :Schéma d'une fonction de transfert.....	31
Figure III. 4 : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	37
Figure III. 5 : Fonction de désirabilité de l'optimisation.....	40
Figure III. 6 : Variation de la réponse pH dans le plan coagulant, floculant.....	41
Figure III. 7 : Variation de la réponse pour la turbidité dans le plan coagulant floculant .....	42
Figure III. 8 : Fonction de désirabilité de l'optimisation.....	44
Figure III. 9 : Variation de la réponse pour la turbidité dans le plan coagulant floculant .....	45

## Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Relation entre la minéralisation et la conductivité électrique [14] .....	9
Tableau III. 1 : valeurs de pH, conductivité et turbidité des eaux usée par l'Amidon et le chlorure de fer (FeCl <sub>3</sub> ) .....	Error! Bookmark not defined.
Tableau III. 2 : Le champ expérimental des facteurs étudiés.....	35

<b>Tableau III. 3 : Matrice d'expériences</b> .....	36
<b>Tableau III. 4 : Résumé de l'ajustement</b> .....	37
<b>Tableau III. 5 : Analyse de la variance</b> .....	38
<b>Tableau III. 6 : Estimations des coefficients</b> .....	38
<b>Tableau III. 7 : Estimations des coefficients triés</b> .....	38

## Introduction générale

L'eau constitue un élément essentiel dans la vie et l'activité humaine. C'est une composante majeure des mondes minéral et organique. Dans le monde présent, l'eau participe à toutes les activités quotidiennes notamment, domestiques, industrielles et agricoles ce qui la rend un élément récepteur exposé à tous les genres de pollution.

La nécessité d'un traitement adéquat des eaux usées par lequel de contribuer à l'amélioration des performances du traitement. Il existe plusieurs types différents de procédés de traitement des eaux usées, le procédé de traitement est le traitement par coagulation-floculation apparaît de plus en plus comme non seulement un procédé de clarification mais également comme un traitement d'élimination spécifique de la matière organique dissoute. Elle permet d'éliminer les particules colloïdales qui sont des sources de contamination par la suite [1].

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [2]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

Ce travail est consacré à l'optimisation par méthode des plans d'expériences, du traitement coagulation floculation de l'eau polluée (cimentaire) et déterminer des valeurs optimales des différents paramètres (pH, turbidité et conductivité).

Ce mémoire de fin d'études comporte essentiellement trois parties :

Le premier chapitre rappellera quelques généralités sur la pollution de l'eau, les types de pollution et les types de traitement ;

Le deuxième chapitre représente le matériel, produits utilisés et une partie théorique sur la méthode de plan d'expérience utilisé pour l'analyse des résultats.

Le chapitre 3 résume les résultats obtenus et interprétation. En fin, une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Revue**

### **Bibliographique**

# Chapitre I : Revue Bibliographique

## I.1 Introduction

L'eau est l'un des éléments les plus indispensables dans notre vie. En raison de l'insuffisance des ressources naturelles en eau utilisable, et l'augmentation de taux de pollution, l'humanité se retrouve face à une obligation de revalorisation et de recyclage des eaux utilisées quotidiennement. Il existe à l'heure actuelle une vaste gamme de méthodes et techniques de traitement, visant à éliminer les divers polluants présents dans les eaux contaminées. Parmi les procédés les plus utilisés, celui de l'adsorption qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche au cours des dernières années et représente un moyen sûr pour le traitement de divers types d'effluents, contenant de faibles concentrations en métaux. Parmi les matériaux poreux les plus utilisés aujourd'hui, nous pouvons citer les charbons actifs et les zéolithes. Ces dernières font l'objet d'une grande attention de la part des scientifiques, et deviennent des adsorbants stratégiques en termes d'énergie et de développement durable grâce à leur microporosité, leur structure qui est un élément clé pour la mise en œuvre de leurs applications industrielles [3].

## I.2 Définition de l'eau

L'eau est un corps, incolore, inodore et sans saveur. C'est un composé chimique simple, liquide à température et pression ambiantes. Sa formule chimique est  $H_2O$  [4], c'est-à-dire que chaque molécule d'eau est constituée d'un atome d'oxygène (O) relié à deux atomes d'hydrogène (H) par deux liaisons covalentes simples, formant un angle de  $104,5^\circ$ .

La représentation de la molécule d'eau sous sa forme compacte donne une image de la forme réelle de la molécule et de l'encombrement des atomes qui la constituent [5].

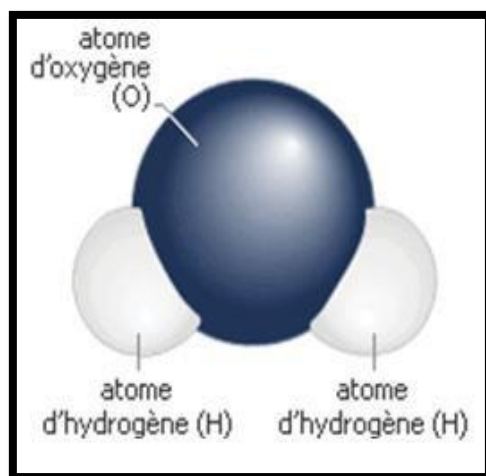


Figure I.1 :La particule d'eau [5].

# Chapitre I : Revue Bibliographique

Cette ressource naturelle se trouve presque partout elle recouvre près de 70 % de la surface de la Terre. 97 % d'eau est salée, essentiellement sous forme d'océans et mer, alors que la fraction douce ne présente que 3 % [4].

Le terme eau dérive du latin aqua. Ce dernier a été ensuite repris pour former quelques mots comme aquarium, un mélange aqueux.

Suivant la composition chimique de l'eau qui induit son origine ou son usage, on précise :

- Eau brute, eau potable, eau minérale, eau de source, eau de mer, eau douce, eau de pluie, eau du robinet, eau gazeuse...
- En chimie, on parle d'eau lourde, eau dure, eau distillée [6].

## a. L'eau brute

L'eau brute désigne celle qui n'a pas été traitée, c'est-à-dire, l'eau dans l'état où elle est prélevée dans le milieu naturel, et qui n'a pas été introduite dans le réseau de distribution [7].

## b. L'eau potable

L'eau potable est une eau brute ; qui a subi des traitements avant sa distribution [8]. On appelle aussi une eau de consommation qui peut être définie en ce qui concerne l'OMS comme une eau ne contenant en quantité dangereuse, ni substances chimiques, ni des germes nocifs à la santé de consommateur [9].

La qualité de l'eau ne doit pas nuire à la santé du consommateur. Elle doit être conforme à la réglementation sanitaire [10].

### I.2.1 Les paramètres physicochimiques de l'eau

#### a) La température

Pour l'eau potable, la température maximale acceptable est de 15°C, car on admet que l'eau doit être rafraîchissante. Dans les eaux naturelles et au-dessus de 15°C, il y a un risque de croissance accélérée de micro-organismes, d'algues, entraînant des goûts et des odeurs désagréables ainsi qu'une augmentation de couleur et de la turbidité.

Les variations de température saisonnières peuvent affecter les eaux, surtout quand elles sont superficielles. [11]

Une température élevée peut favoriser des goûts et des odeurs désagréables. De plus elle accélère la plupart des réactions physico-chimiques. Les acteurs des eaux peuvent difficilement agir sur la température de l'eau. Les efforts doivent donc se porter sur d'autres paramètres qui évoluent en fonction de la température.

# Chapitre I : Revue Bibliographique

La température est un critère physique important dans l'appréciation d'une eau. Elle joue un rôle important dans :

- La solubilité des sels et d'autres matières ; elle influe sur la conductivité et le pH.
- La solubilité des gaz ; l'augmentation de la température s'accompagne d'une diminution de la concentration de l'oxygène dissous, préjudiciable à la flore et aux processus d'autoépuration. [12]

## b) La Turbidité

La turbidité traduit la présence de matières étrangères en suspension dans l'eau et éveille la méfiance et la répugnance du consommateur. En outre, elle nuit au taux de filtration et risque de diminuer l'efficacité de la désinfection, le contact entre les germes pathogènes et l'agent désinfectant étant défavorisé. L'un des buts primordiaux du traitement est de réduire la turbidité.

L'effet bactéricide est neutralisé et l'acide hypochloreux (HClO) ne se forme pas dans le cas d'une turbidité élevée et contenant des matières organiques.

D'après les normes la turbidité maximale acceptable est de 5 NTU (car elle est alors perceptible) et l'objectif est égal ou inférieur à 1. Les eaux convenablement filtrées et désinfectées ont des turbidités inférieures à 0,5 NTU.

Dans le réseau, une turbidité élevée de l'eau révèle les problèmes suivants :

- Précipitation de fer, aluminium ou manganèse due à une oxydation dans le réseau,
- Des précipités formés par l'effet de post-floculation dans le réseau (effort persistant du floculant et polymérisation non achevée) dégradent la qualité organique. [13]

## c) Le pH (potentiel hydrogène)

Le pH mesurant l'acidité d'une solution, est défini par l'expression  $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$  où  $(\text{H}^+)$  est l'activité de l'ion hydrogène  $\text{H}^+$  dans la solution. [14]

Les équilibres physicochimiques sont conditionnés par le pH. Il intervient avec d'autres paramètres comme la dureté, l'alcalinité et la température, Habituellement il varie entre 7,2 et 7,6. [15]

Cependant, dans certains cas, il peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Des pH faibles augmentent le risque de présence de métaux sous forme

# Chapitre I : Revue Bibliographique

ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, Toxique pour les poissons. [16]

## d) La conductivité

La conductivité électrique d'eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Généralement l'on considère que la situation est particulière ou anormale au-delà de 2000 µS/cm et une conductivité de l'eau supérieure à 1500 µS/cm classe alors une eau comme difficilement utilisable dans les zones irriguées. Pour les usages industriels, l'interprétation des résultats doit se faire en fonction d'une analyse complète de l'eau retenons, pour le contrôle des rejets industriels, que la conductivité ne reflète qu'une minéralisation globale et que l'identification des éléments chimiques en cause est assez difficile [16]

*Tableau I. 1 : Relation entre la minéralisation et la conductivité électrique [14]*

Conductivité électrique	Taux de minéralisation
CE < 100 µs / cm	Minéralisation très faible
100 < C.E < 200 µs / cm	Minéralisation faible
200 < C.E < 333 µs / cm	Minéralisation moyenne
333 < C.E < 666 µs / cm	Minéralisation Moyenne accentée
666 < C.E < 1000 µs / cm	Minéralisation importante
C.E > 1000 µs / cm	Minéralisation élevée

## I.2.3 Les états physiques de l'eau

On peut trouver l'eau sous trois formes ou « états » : liquide, solide et gazeux.

### 1. L'état vapeur

Il est obtenu à partir de 100°C à la pression atmosphérique ; les molécules sont relativement indépendantes les unes des autres et correspondent au modèle angulaire [17].

L'humidité de l'air provient de l'évaporation des mers et eaux douces et de l'évapotranspiration des plantes. On pourra alors la trouver aussi sous forme de nuages puisqu'il s'agit là d'un amas de gouttelettes [18].

### 2. L'état solide

On trouve également l'eau sous forme solide, c'est à dire sous forme de glace : glaciers, icebergs etc.



# Chapitre I : Revue Bibliographique

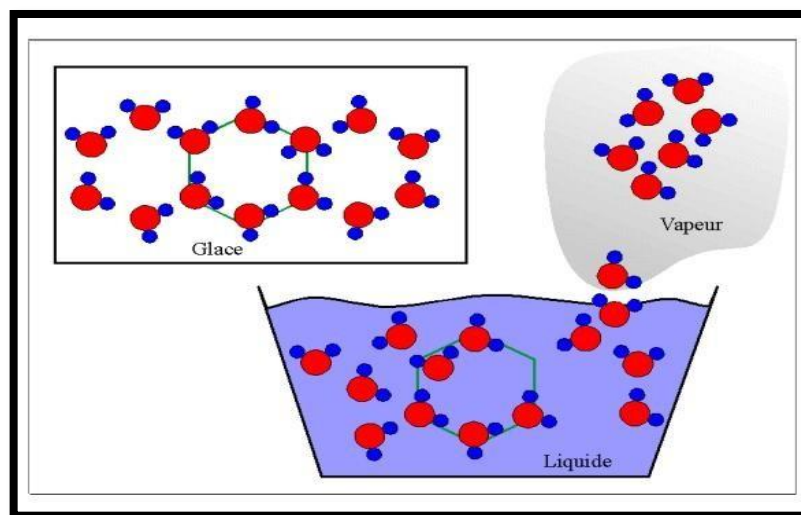
[18].

Il est obtenu en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$  sous la pression atmosphérique ; les molécules sont disposées suivant un tétraèdre avec une molécule d'eau centrale et quatre autres disposées suivant les quatre sommets d'un tétraèdre régulier. Le réseau qui en résulte est hexagonal. Les molécules sont assemblées par des liaisons hydrogène, chaque atome d'hydrogène d'une molécule d'eau étant liée à l'atome d'oxygène de la molécule voisine [17].

### 3. L'état liquide

Sur terre c'est sous sa forme liquide qu'elle est la plus présente. En effet près de 70% de la surface de la terre est recouverte d'eau (97% d'eau salée et 3% d'eau douce) essentiellement sous forme d'océans, mais on va aussi la trouver dans la mer, dans des zones humides du type tourbière ou marécage, dans les lagunes, les lacs, les étangs, les mares, les fleuves, les rivières, les ruisseaux, ainsi que dans les réseaux de type canaux, fossés [18].

Au cours de la fusion de la glace, les liaisons hydrogène se rompent, le cristal s'effondre et les molécules se rapprochent les unes des autres, la masse volumique augmente jusqu'à une valeur maximale correspondant à une température de  $4^{\circ}\text{C}$  sous 1 atmosphère [19].



*Figure I. 2 : Les différentes dispositions des molécules d'eau dans ses trois états [17].*

### I.2.3 Les propriétés de l'eau

Même si l'eau est un liquide inodore, incolore et sans saveur, d'autres propriétés physiques ou

# Chapitre I : Revue Bibliographique

chimiques lui confèrent des qualités qu'il faut connaître pour comprendre mieux le rôle fondamental que joue cette molécule sur notre planète aussi bien comme facteur essentiel pour les écosystèmes que comme élément vital pour les êtres vivants [17].

## - Les propriétés physiques

L'eau a des propriétés physiques assez particulières par rapport aux autres liquides. Elle apparaît comme un liquide "structurée", et non désordonné comme les autres liquides, par le fait que ses constituants élémentaires sont associés [20].

Parmi les propriétés physiques les plus intéressants pour le traitement de l'eau sont les suivants :

### + La masse volumique

Pour l'eau pure sous pression normale, elle passe par un maximum à environ 4°C (1 Kg/l) et sa variation en fonction de la température [21].

### + La viscosité

La viscosité est un concept qui paraît simple et clair, à première vue, mais qui devient fort complexe lorsqu'on va au fond des choses. Il intervient notamment dans la force avec laquelle les couches plus rapides entraînent les couches plus lentes d'un fluide en écoulement laminaire [23].

C'est la propriété que présente un fluide d'opposer une résistance aux divers mouvements soit internes (ex : turbulence), soit globaux (ex : écoulement).

Cette résistance est due aux frottements réciproques des molécules en mouvement elle est à la base des pertes d'énergie cinétique (pertes de charge) et joue donc un rôle important en traitement d'eau [21].

## I.3 La pollution de l'eau

La pollution est la dégradation ou la modification de l'équilibre d'un milieu aquatique par introduction d'une substance provenant de l'activité humaine [25].

### I.3.1 Selon la répartition géographique

#### - La pollution diffuse

La pollution diffuse (indirecte) est la pollution la plus répandue et, de nos jours, la plus néfaste. Ce type de pollution contamine l'eau sur de longues périodes.

La pollution diffuse est plus difficile à contrôler que la pollution ponctuelle parce qu'elle est liée à une multitude de sources réparties sur l'ensemble du territoire [26].

#### - La pollution ponctuelle

## Chapitre I : Revue Bibliographique

La pollution ponctuelle (directe) est la pollution qui provient d'un point unique et identifiable, par exemple, l'effluent d'une usine. Ce type de pollution est le plus connu et souvent le plus polluant à court terme. Les émissions de ce type de pollution sont généralement beaucoup plus polluantes que celles produites par la pollution diffuse [26].

### I.3.2 En fonction de l'origine de la pollution

On a quatre principales origines de pollution sont :

#### **-La pollution agricole**

Les agriculteurs utilisent l'eau pour abreuver le bétail et irriguer les terres cultivables ; Les déjections animales (lisier, fumier) sont source de pollution. Lorsque les animaux sont concentrés de façon importante sur un même site (élevage hors-sol), il y a concentration de la pollution.

Les agriculteurs utilisent des engrais minéraux et des pesticides pour améliorer le rendement de leur culture. La mauvaise utilisation d'engrais, de façon non adaptée aux besoins des sols et des cultures, est source de pollution diffuse. Les produits épandus en surplus ne sont pas absorbés par les plantes. Ils ruissellent à la surface du sol ou s'infiltrent dans le sol en direction des rivières ou des nappes souterraines [27].

#### **-La pollution industrielle**

Les industriels peuvent utiliser l'eau pour fabriquer les produits (eaux de procédé), pour refroidir les machines (eaux de refroidissement), pour l'hygiène des employés (eaux sanitaires) ou pour nettoyer l'usine (eaux de lavage). Tous les ateliers de production ne génèrent pas une pollution de même type ni de même importance.

On distingue différents types d'activités industrielles. Par exemple, les industries lourdes, les industries chimiques et certaines industries de transformation des métaux peuvent être la source d'une pollution toxique et persistante. Certains produits rejetés ont une durée de vie longue avant de pouvoir être biodégradés. Les industries de fabrication des produits alimentaires rejettent principalement de la matière organique et des fertilisants [28]. Les rejets d'eau polluée des industries sont appelés les effluents industriels.

#### **-La pollution domestique**

Les hommes utilisent l'eau tous les jours pour se désaltérer, se laver, cuisiner et accomplir un grand nombre de tâches domestiques. Dans les villes, après avoir été utilisée, l'eau dite « usée » est collectée par un réseau d'égouts. Les effluents urbains sont acheminés par ce réseau jusqu'à une

## Chapitre I : Revue Bibliographique

station d'épuration où ils sont traités avant d'être rejetés à la rivière. Il existe différents types de stations d'épuration. Les effluents doivent respecter certaines normes avant d'être rejetés. Le couple « réseau d'égouts + station d'épuration » s'appelle un système d'assainissement. Les eaux de pluies qui ruissellent sur des surfaces imperméabilisées (rues, stationnement, toitures) peuvent aussi être source de pollution. Il devient nécessaire de les prendre en compte dans les projets d'assainissement. Dans les campagnes, lorsque les habitations ne sont pas concentrées autour d'un centre-ville, les effluents ne peuvent pas être traités de façon collective. Chaque habitation doit alors être équipée d'une fosse septique et d'un système d'épandage souterrain qui permet d'infiltrer les eaux traitées dans le sol [33].

### I.3.3 La pollution par les hydrocarbures (ou pollution pétrolière)

L'homme gagne peu à peu du terrain dans des zones restées intactes presque et inhabitées, s'étendant jusqu'aux contrées autrefois considérées comme inaccessibles. Des besoins en énergie sans cesse croissants conduisent à l'exploitation pétrolière des régions arctiques, mettant en péril le fragile équilibre des écosystèmes qui constituent la toundra [29].

### I.3.4 Selon la nature des polluants

#### -La pollution physique

L'utilisation de l'eau comme liquide de refroidissement dans des centrales thermiques réchauffe les rivières dans lesquelles le rejet s'effectue. Cette élévation de température diminue la teneur en oxygène de l'eau et donc la capacité de vie des différentes espèces. La pollution thermique agit sur la température de l'eau, la pollution mécanique altère sa transparence par les matières en suspension.

D'autres pollutions physiques agissent sur l'acidité, la salinité, la radioactivité, etc. Ces pollutions perturbent les écosystèmes et diminuent la biodiversité [25].

#### -La pollution chimique

Elle provoque des déséquilibres biologiques à court ou long terme.

- A court terme : la dose fait le poison, souvent, si l'on supprime la cause, l'effet disparaît rapidement.
- A long terme : Les rejets de substances toxiques : ils proviennent d'industrie, d'égouts urbains, des transports ou de l'utilisation de pesticides en agriculture [25].

#### -La pollution organique

La pollution organique constitue souvent la fraction la plus importante d'autant plus que dans son

## Chapitre I : Revue Bibliographique

acceptation la plus large, cette forme de pollution peut être considérée comme résultant de diverses activités (urbaines, industrielles, artisanales et rurales).

Dans les eaux usées urbaines, on peut trouver les matières organiques banales (protides, lipides, glucides), les détergents, les huiles et goudrons, les micropolluants organiques peuvent entraîner la modification des caractères organoleptiques de l'eau, ainsi que l'apparition des phénomènes toxiques [30].

Les polluants organiques évoluent dans le temps car ils sont constitués de matières vivantes qui ont besoin d'oxygène et dégageront des odeurs de putréfaction [31].

### **I.3.5 La pollution microbiologique, biologique et bactériologique**

Il provient de l'agriculture, des hôpitaux et même de la vie domestique. Elle peut introduire dans l'eau des micro-organismes dont certains sont pathogènes.

#### **1. Les nouveaux polluants**

Ce sont principalement des médicaments rejetés dans l'eau au travers des réseaux de collecte d'effluents.

#### **2. Les retombées acides**

La pollution acide est générées par les retombées des polluants industriels et urbains (soufre, azote, ammoniac) sous l'effet des vents et des pluies. Elle est considérée comme en partie responsable de la dégradation des forêts, de l'altération des sols, de la disparition de la faune aquatique dans les rivières et les lacs, de la corrosion des pierres et autres matériaux [25].

### **I.4 Rôle de la coagulation-floculation**

Les procédés de coagulation et de floculation facilitent l'élimination des MES et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floc dont la séparation est ensuite effectuée par des systèmes de décantation, flottation et/ou filtration (voir décantation et filtration, de même que flocculateurs - décanteurs - flottateurs et les filtres) ; Ils constituent les traitements de base appliqués pour corriger tout ou partie des défauts de l'eau liés aux fractions particulières inertes (limons, argiles, colloïdes) ou vivantes (microalgues planctoniques ; micro- invertébrés, en particulier les kystes des protozoaires parasites : amibes, Giardia, Cryptosporidium... ; bactéries).

Ils assurent aussi l'élimination de la fraction « floculable » des matières organiques (macromolécules, en particulier la plupart des acides humiques responsables de la couleur), de certains métaux lourds, plus généralement de la fraction des micropolluants associée à ces MES et macromolécules colloïdales dont les virus, pratiquement toujours portés par les MES et colloïdes

# Chapitre I : Revue Bibliographique

de l'eau.[34]

## I.4.1 Mécanisme de la coagulation floculation

La coagulation représente l'ensemble des phénomènes physico-chimiques visant à déstabiliser une solution de particules très petites de charge négative, appelées colloïdes ( $\varnothing < 1\mu\text{m}$ ), et favoriser leur agglomération.

Généralement les particules colloïdales possèdent une charge électrique négative et identique ce qui les amène à se repousser et ne pas former de flocs facilement décantables. Elle permet la neutralisation de la surface de la charge des colloïdes par l'addition d'ions à charge positive, sels métalliques ou minéraux.

La floculation c'est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques menant à l'agrégation de particules stabilisées pour former des flocons ou flocs. Après coagulation, les particules possèdent une énergie cinétique supérieure à celle qui est nécessaire pour vaincre les forces électrostatiques de répulsion ; le phénomène est réversible, c'est-à-dire que l'on peut casser ces agrégats, par exemple en agitant fortement le liquide, pour retrouver la solution de colloïdes initiale.

La décantation quant à elle, a pour but d'éliminer les particules en suspension dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Les particules s'accumulent au fond du bassin de décantation d'où on les extrait périodiquement ; L'eau clarifiée, située près de la surface, est dirigée vers l'unité de filtration. Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique ; Il est donc impossible que certaines particules notamment les colloïdes et les particules à surface spécifique très élevée décantent naturellement. Pour obtenir la décantation de ces particules, il faudrait assembler un très grand nombre de colloïdes en agrégats d'au moins 10 à 100  $\mu\text{m}$ .

## I.4.2 Suspensions colloïdales

Le terme colloïde est proposé par Thomas Graham en 1861. Il provient des mots grecque (Kolle) qui signifie colle, et (eido) ou (eidomei) qui signifie comme. [35]

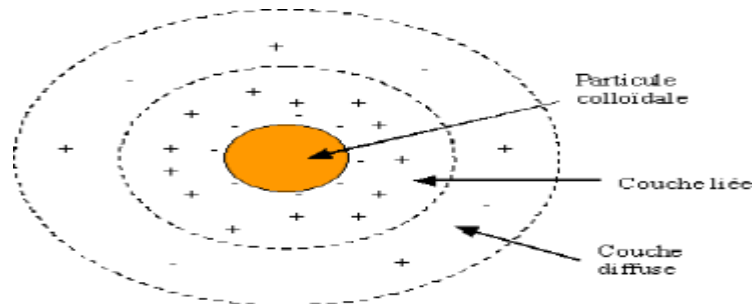
Les colloïdes sont des particules organiques ou minérales dont la taille est comprise entre quelques nanomètres et un micromètre environ.

### -Théorie de la double couche

Lorsqu'une particule colloïdale est suspendue dans un milieu polaire qui contient des ions, elle attire électro statiquement des ions de charge opposée. Il s'ensuit qu'aux abords de la particule chargée, les charges électriques portées par des ions se répartissent en deux couches, comme illustré par la figure (I. 1) ; Diverses théories ont été avancées :

## Chapitre I : Revue Bibliographique

- Théorie de Helmholtz : Une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche fixée);
- Théorie de Gouy-Chapman : La couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde ; la neutralité est obtenue à plus grande distance (couche diffuse).[36]



*Figure I. 3 : Double couche d'une particule colloïdale*

### -Potentiel Zêta

Un colloïde se caractérise par deux potentiels (figure 1-4)

- **E** : potentiel thermodynamique, encore appelé potentiel de Nernst, présent à la surface même du colloïde mais non mesurable par des méthodes simples.
- **Z** : Potentiel à la surface de la couche fixe, aussi appelé potentiel électrocinétique ou potentiel Zéta. Ce potentiel reste, comme déjà indiqué, négatif, les charges des ions de la couche fixée ne compensant pas les charges négatives de surface du colloïde. Il régit l'interaction mutuelle des colloïdes et peut être mesuré par électrophorèse ; en effet quand un colloïde est soumis à un champ électrique, il atteint une vitesse telle qu'un équilibre s'établit entre la force électrique d'attraction vers l'anode et la force de frottement due à la viscosité du milieu.
- La relation liant cette vitesse (mobilité électrophorétique) et le potentiel Zéta est de la forme:  
On notera que, par définition, des particules ayant le même potentiel électrocinétique Zéta possèdent la même mobilité électrophorétique, indépendamment de leur diamètre.[37]

# Chapitre I : Revue Bibliographique

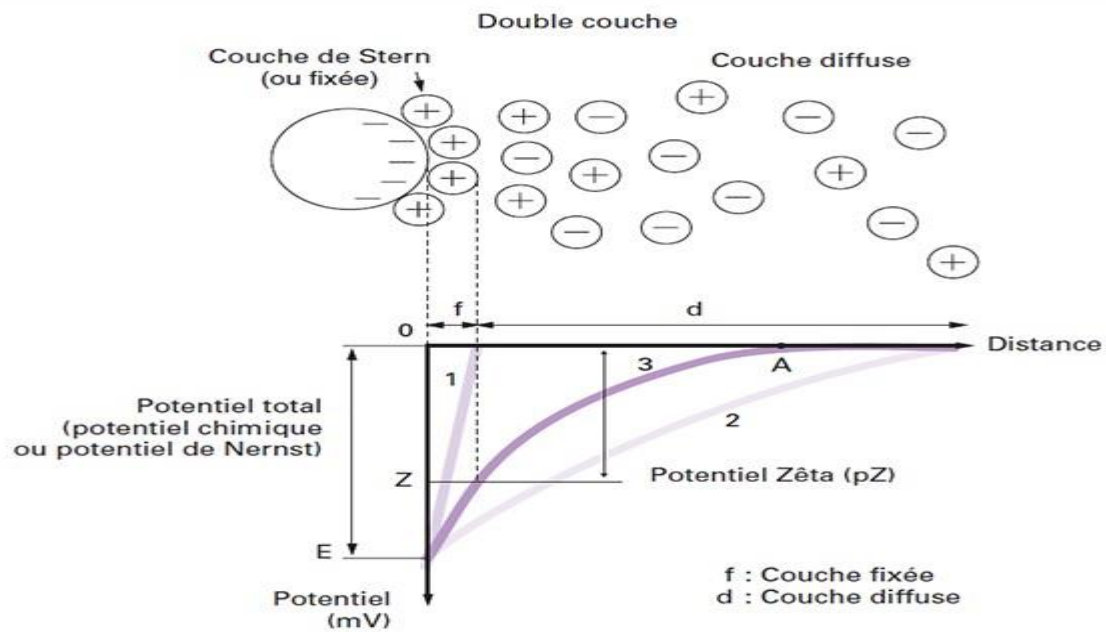


Figure I. 4 : Potentiel zêta.

$$Z = \frac{K \cdot \mu}{\epsilon}$$

$\mu$  : Mobilité électrophorétique ( $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ ),

$\epsilon$ : Constante diélectrique du milieu,  $\mu$

$\eta$  : Viscosité dynamique ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),

$k$  : fonction du diamètre de la particule et de l'épaisseur de la double couche.

## -Force d'attraction-répulsion

Les suspensions colloïdales sont souvent stables pendant de longues périodes parce que leurs particules sont chargées positivement ou négativement, et qu'elles se repoussent mutuellement par des forces de répulsion électrostatique. Il existe également des forces d'attraction moléculaires qui favorisent le rapprochement des particules dispersées.

Lorsque deux particules entrent en contact, elles s'agglomèrent en un flocon stable qui se comporte



# Chapitre I : Revue Bibliographique

comme une particule unique.

## I.4.3 Facteurs influençant la coagulation-floculation

Le processus de coagulation est complexe et peut être influencé par plusieurs facteurs, on retrouve :

### a) Effets du pH

Le pH a une influence primordiale sur la coagulation. Il est d'ailleurs important de remarquer que l'ajout d'un coagulant modifie souvent le pH de l'eau.

La plage du pH optimal est la plage à l'intérieur de laquelle la coagulation a lieu suffisamment rapidement. En effet, une coagulation réalisée à un pH non optimal peut entraîner une augmentation significative du temps de coagulation.

### b) Effet de la dose de coagulant

La dose de réactif est aussi un paramètre à prendre en compte ; le coagulant qui est habituellement fortement acide a tendance à abaisser le pH de l'eau. Pour se placer au pH optimal, il est possible d'ajouter un acide ou une base.

Une dose de coagulant excessive entraîne une ré-stabilisation des particules et augmentations du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité de l'eau traitée insuffisante.

La quantité de réactifs ne peut se déterminer facilement. Pratiquement, la dose optimale de coagulant peut être déterminée soit par la mesure du potentiel zêta, soit par un test au laboratoire, connu sous le nom de (Jar-test).

La nature du coagulant peut aussi influencer ce phénomène ainsi que la température. En effet, Comme toute réaction chimique, la floculation est accélérée par l'élévation de température. La floculation des eaux froides est donc plus lente et moins complète que celle des eaux chaudes. D'autre part, la rapide augmentation de la viscosité de l'eau lorsque la température s'abaisse diminue le nombre de chocs efficaces entre les particules. Nous savons qu'une baisse de température ralentit la cinétique des réactions chimiques.

### c) Effet de la vitesse d'agitation

La coagulation nécessite une vitesse plutôt rapide, afin de bien mélanger l'eau et que les colloïdes et les cations métalliques se rencontrent et se neutralisent, alors que la floculation nécessite une vitesse relativement lente, afin de favoriser la rencontre et l'agrégation des colloïdes mais sans détruire les floes déjà formés.

# Chapitre I : Revue Bibliographique

## I.3.4 Les coagulants

Les coagulants sont des produits qui neutralisent les charges de surface des matières colloïdales. On retrouve : [34].

### -Les coagulants minéraux

Sont généralement des sels de métaux qui donnent des cations métalliques, principalement des sels d'aluminium ou de fer. Les sels d'aluminium les plus utilisés sont le sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$ , le chlorure d'aluminium  $AlCl_3$ . Pour les sels de fer, il y a le chlorure ferrique  $FeCl_3$ , le sulfate ferrique  $Fe_2(SO_4)_3$  et le sulfate ferreux  $FeSO_4$

## I.3.5 Les flocculants

L'utilisation d'un seul coagulant ne permet pas, dans tous les cas, d'obtenir une bonne coagulation floculation. L'utilisation d'un aide-coagulant permet d'améliorer les performances du procédé de coagulation floculation.

### a) Les flocculats organiques

Sont des polymères hydrosolubles pouvant avoir une charge anionique, cationique ou neutre. Ils agissent par adsorption, on en distingue les dérivés amylicés et les polysaccharides tels que l'alginate de sodium, la pectine ou le carraghénane.

### b) Les flocculant de type polymères (poly électrolytes) synthétiques

De manière générale, ce sont des composés de haut poids moléculaires 10<sup>4</sup>-10<sup>6</sup> Da de types anioniques, cationiques ou non ioniques. L'intensité de la charge d'un polymère dépend de son degré d'ionisation qui dépend à son tour des charges sur les groupes fonctionnels, du degré de copolymérisation et de la quantité de groupes fonctionnels qui ont été substitués.

En solution, ils ont un taux de diffusion relativement bas et ils augmentent la viscosité. Le brassage est donc nécessaire à la dispersion des polymères. Ils peuvent être employés pour la neutralisation, l'émulsion et/ou pour créer des ponts entre les particules colloïdales.

Leur efficacité dépend généralement des paramètres suivants : la concentration du polymère, la charge globale et la densité de charge, le poids moléculaire, les caractéristiques de l'effluent et les paramètres physiques (dosage, énergie de brassage, pH, etc.). (38)

### c) Les flocculants minéraux

Ce sont des composés colloïdaux agissant soit par adsorption, soit par neutralisation de charges sur les produits en suspension. Ils comprennent la silice activée ou la silicoaluminates.

# Chapitre I : Revue Bibliographique

## d) Autres adjuvants minéraux

En amont d'une décantation ou d'une filtration, certains produits sont utilisés pour charger une eau brute qui ne contient pas assez de MES. Ce ne sont pas des flocculants mais ils participent à la croissance du floc et sa densification ; ce sont par exemple :

- Certaines argiles (bentonine,kaolin),
- Carbonate de calcium enpoudre,
- Charbon actif enpoudre,
- Sablefin.[39]

**Chapitre II**  
**Techniques**  
**Expérimentales**

# Chapitre II : Techniques Expérimentales

## II.1 Introduction

Ce chapitre présente une description détaillée des réactifs utilisés ainsi que des protocoles expérimentaux suivis en cours des essais. Ces essais ont été réalisés sur l'eau usée (cimentaire), afin de déterminer les différents paramètres physico- chimiques.

Un traitement par coagulation-floculation chimique, est réalisé au moyen d'un équipement Jar Test dans le but d'éliminer la turbidité.

## II.2 Les paramètres de l'eau avant le Traitement

- Turbidité= 83 NUT
- pH=10,46
- T=22,6 C°
- Conductivité=2,94 ms /cm

### II.2.1 L'échantillonnage

Les essais par le jar test ont été réalisés sur un type d'eau usée ; eau cimentaire

### II.2.2 Principe de Jar-test

Depuis plus de 50 ans, le Jar-test est la technique standard utilisée pour optimiser l'addition de coagulants et de floculant dans le domaine du traitement de l'eau. Un exemple d'étude permet de présenter des essais expérimentaux de déphosphoration pères au laboratoire. Les jars tests sont réalisés sur un banc d'essai dans des béchers de 1 litre(fig.2-2).

- **Coagulant**

C'est une substance chimique comme l'alun qui cause l'agglomération des particules fines par compensation des charges des substances par rapport à des charges opposées positives de cations trivalents ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , ..) et permet de former ainsi un précipité gélatineux dans l'eau pouvant ensuite être filtré. [30]

- **Floculant**

L'amidon c'est un polymère qui emprisonne les matières colloïdales agglomérées et forme ainsi des flocons volumineux qui se déposent par gravité. Il est ajouté après la coagulation pour augmenter davantage la taille et la cohésion des flocs. [32]

## Chapitre II : Techniques Expérimentales



*Figure II. 1:Jar-test*

### 1. Protocole

L'appareil d'essai est constitué par un flocculateur à 6 agitateurs avec une vitesse de rotation individuelle variant entre 0 et 200 tr /min. cet appareil permet d'agiter simultanément le liquide contenu dans une série de 06 béchers, Pour effectuer les expériences :

1. Mettre le flocculateur dans un endroit protégé de la lumière, de la chaleur, des courants d'air et des vibrations. Opérer à une température la plus proche possible de l'eau à traiter (il est parfois nécessaire de travailler en extérieur) ;
2. Laver bien les béchers et s'assurer qu'il ne reste aucune trace de détergent, remplir ensuite les béchers de flocculation avec l'eau à tester en prenant soin d'effectuer des prélèvements homogènes (200 ml). Placer chaque bécher sous l'agitateur et submerger les palettes ;
3. Ensuite, mettre les quantités Coagulants-Floculats Ce que nous avons déjà pesé selon le tableau (chapitre III) (Gardez-les en même temps) ;
4. Maintenez l'agitation rapide (100tours/min) pendant 3 minutes ;
5. Réduisez la vitesse d'agitation à 20tours/min pour les 20 prochaines minutes ;
6. Arrêtez l'agitation et relevez les hélices ;
7. Attendre 15 minutes de décantation (ou 20 minutes si le floc est petit et l'eau très froide) ;
8. Prélever par pipette la moitié de la hauteur d'eau de chacun des béchers et filtrer par papier filtre ;
9. Sur les échantillons filtrer ainsi que sur l'eau brute, on effectuera les mesures suivantes :
  - pH
  - Conductivité
  - Turbidité

## Chapitre II : Techniques Expérimentales

Les analyses physico-chimiques sont toutes effectuées au laboratoire en utilisant des appareils appropriés. les échantillons d'eau cimentaire sont prélevés dans des flacons de 100 ml afin de mesurer trois (03) paramètres à savoir la turbidité (NTU), la conductivité (ms/cm) et le pH

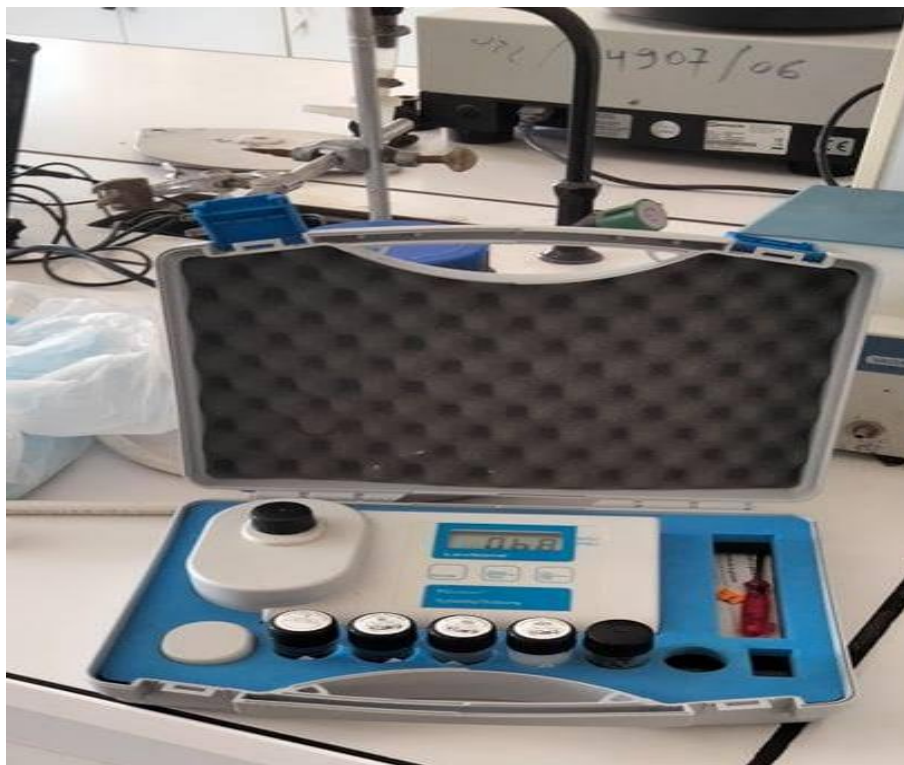
### 2.1 Mesure de la turbidité

#### ➤ Principe

La turbidité d'une eau est la dégradation de la transparence d'un liquide qui est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques...etc. L'appréciation de l'abondance de ces particules mesure son degré de turbidité. Celui-ci sera d'autant plus faible que le traitement de l'eau aura été plus efficace.[40]

#### ➤ Mode opératoire

Remplir une cuvette de mesure propre et bien essuyée avec du papier hygiénique avec l'échantillon à analyser après homogénéisation et effectuer rapidement la mesure. Il est nécessaire de vérifier l'absence de bulle d'air avant la mesure. La mesure est obtenue directement en NTU (Néphélobimétrie Turbidité Unit). La norme algérienne pour l'eau décantée est de 5 NTU. [41]



*Figure II. 2 : Turbidimètre*

### 2.2 Mesure de la conductivité

#### ➤ Principe

## Chapitre II : Techniques Expérimentales

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes de platine (Pt) (ou couvertes de noir de platine) de  $1\text{cm}^2$  de surface maintenues en parallèles et séparées l'une de l'autre de  $1\text{cm}$ . Elle est l'inverse de la résistivité électrique. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m). Elle s'exprime, généralement, en micro siemens par centimètre ( $\mu\text{s/cm}$ ).[41]

### ➤ Mode opératoire

Rincer plusieurs fois la cellule à conductivité, d'abord avec de l'eau distillée puis en la plongeant dans un récipient contenant de l'eau à examiner, et effectuer la mesure. La valeur limite de la conductivité est de  $2800\ \mu\text{s/cm}$ . [41]



*Figure II. 3 : Conductimètre.*

### 2.3 Mesure du pH

#### ➤ Principe

Le pH est en relation avec la concentration des ions hydrogène  $[\text{H}^+]$  présents dans l'eau ou les solutions. Elle représente la différence de potentiel existant entre une électrode de verre et une électrode de référence (Calomel KCl saturé). Plongeant dans une même solution, elle est une fonction linéaire du pH de celle-ci. [41]

#### ➤ Mode opératoire



## Chapitre II : Techniques Expérimentales

Rincer l'électrode avec de l'eau distillée avant utilisation, tremper l'électrode dans un bécher contenant une quantité suffisante d'eau à analyser et attendre la stabilisation, puis noter le pH. Le pH optimal de l'eau est compris entre 6,5 et 8,5. [41]



*Figure II. 4 :PH-mètre*

### II.3 Méthode de plan d'expérience

Le plan d'expérience est une technique qui permet de quantifier les effets de divers facteurs sur une réponse dans des domaines expérimentaux bien déterminés dans le but de les optimiser [42]. L'élaboration d'un plan d'expérience commence par l'extraction d'un nombre suffisant de combinaisons à partir du domaine d'étude, pour estimer avec une incertitude, à la fois minimale mais aussi homogène, les coefficients du modèle polynômial en respectant les contraintes qui peuvent être liées à l'étude quel soit technique ou bien économique [43].

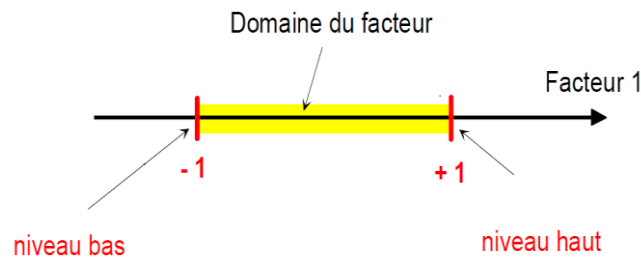
Il existe différents types des plans d'expériences, qui peuvent être regroupés en deux grandes familles [44] :

#### II.3.1 Terminologie

- **La réponse** : Une réponse consiste à une quantification des performances du système étudié [45]
- **Les facteurs** : les paramètres que l'on fait varier au cours des essais et sensés influencer sur la variation de la réponse (les variables que l'on désire étudier) [46]

## Chapitre II : Techniques Expérimentales

- **Domaine d'un facteur** : Un facteur varie généralement entre deux bornes à savoir : la borne inférieure et la borne supérieure. dans les plans d'expériences, un facteur varie entre le niveau bas (borne inférieure notée le plus souvent par -1) et le niveau haut (borne supérieure notée le plus souvent par +1), L'ensemble des valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, est appelé domaine d'un facteur ou bien domaine de variation [47] .

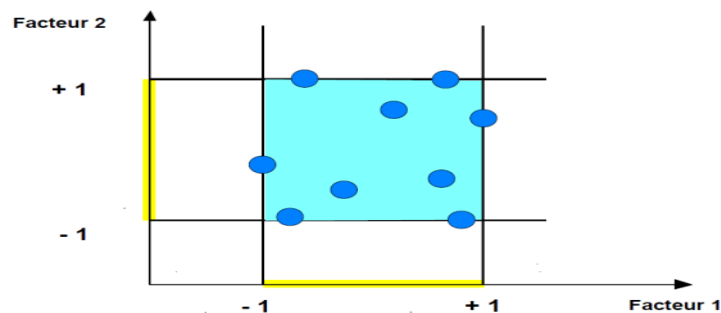


*Figure II. 5 :Domaine du facteur*

Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le **domaine** du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1.

- **Domaine d'étude** : Un seul facteur est représenté par un axe orienté, et s'il y a deux facteurs, le second est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. Ce dernier est disposé orthogonalement au premier, la réunion des domaines de variations de chaque facteur définit le domaine d'étude [47] .



*Figure II. 6 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.*

## Chapitre II : Techniques Expérimentales

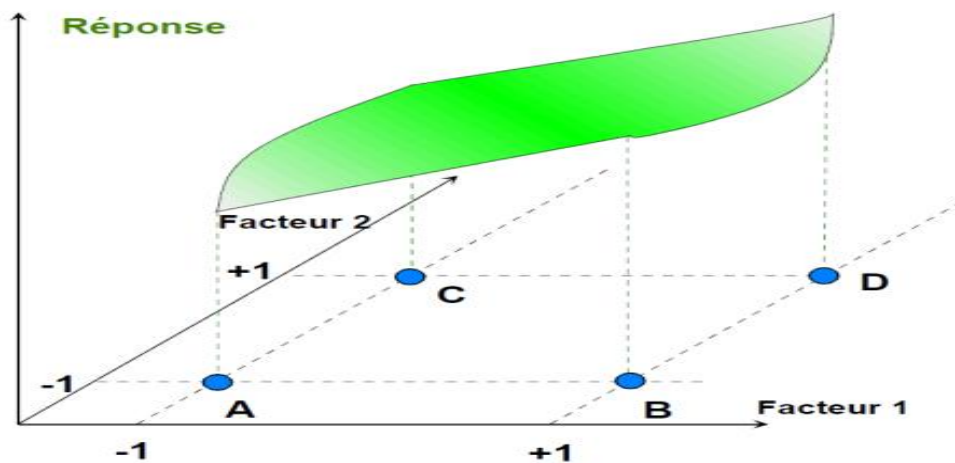
- **Interaction** : L'effet pour lequel l'influence apparente d'un facteur sur une variable de Réponse dépend d'un ou de plusieurs facteurs. L'interaction indique une incohérence de L'effet principal d'un facteur sur la réponse selon le niveau d'un autre facteur . [48]
- **Matrice d'expérience** :

Une matrice d'expérience (**Annexe B**) définit les essais à réaliser.

Le terme essai est l'équivalent de point d'expérience lorsque l'on emploie la représentation en tableau des plans d'expérience. Plusieurs autres appellations existent pour désigner un essai : traitement, combinaison, expérience...etc. [44].

### II.3.2 Plan de surfaces et de réponse (RSM)

Les plans de surface de réponse, ou plans de second degré [46], est une méthode d'optimisation qui a pour principal but l'évaluation des relations pouvant exister entre les différentes réponses, ainsi que les facteurs appelés ( $X_1 X_2 X_3 \dots$  etc). Plusieurs plans factoriels sont employés par cette technique pour l'analyse des résultats à savoir le plan Box-Behnken et le plan composite centré [49].



*Figure II. 7 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse*

. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.

## Chapitre II : Techniques Expérimentales

### II.3.3 Plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux du plan Box-Behnken sont représentés au milieu des arêtes de chacun des côtés d'un cube. C'est un plan qui peut comporter jusqu'à douze essais, auxquels on peut ajouter des points au centre. Un plan avec trois facteurs est illustré dans la figure suivante [46] :

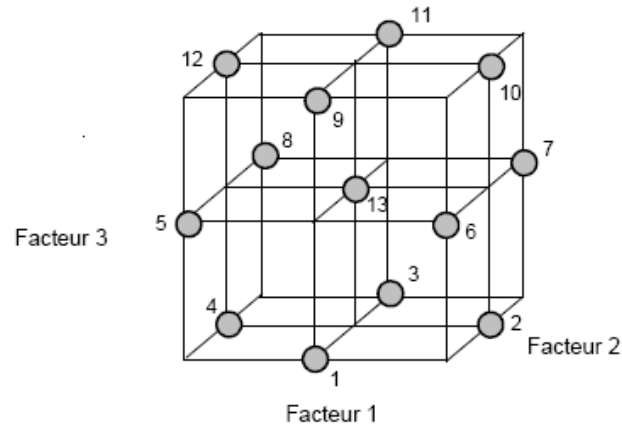


Figure II. 8 : Plan de Box- Behnken pour trois facteurs.

### II.3.4 Modèle mathématique postulé :

Une loi d'évolution générale est donnée lors de l'absence de toute information concernant la fonction qui met en relation la réponse aux facteurs, elle est du type ; Etant trop générale, il en est d'usage de prendre un développement limité de Taylor-MarcLaurin. Le développement précédent prend la forme d'un polynôme de degré plus au moins élevé si les dérivés sont considérés comme des constantes, elle s'écrit :

On a :

$Y$  : c'est la réponse ou grandeur d'intérêt ;

$x_i$  : représente un niveau du facteur  $i$  ;

$x_j$  : représente un niveau de facteur  $j$  [50] .

$a_0, a_j, a_{ij}, a_{ii}$  : sont les coefficients du polynôme [51].

$e$ : L'erreur.

### II.3.5 Principaux avantages des plans d'expériences

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais.

## Chapitre II : Techniques Expérimentales

- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection des interactions entre facteurs.
- Modélisation des réponses étudiées.

Une précision optimum des résultats La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié.

### II.4 Méthode des surfaces de réponse (M.S.R) : Principes et définitions

La Méthode des Surfaces de Réponse (M.S.R) s'est développée dans différents domaines scientifiques, citons en particulier : la biologie, la chimie, les sciences humaines et l'agronomie. La construction de courbes de croissance en biologie animale et végétale ([Wis39], [Win32]), l'étude de fertilisation des sols et l'agronomie ([Mit30], [CY41], [Ste51]), durant les années 30, sont les premiers domaines dans lesquels l'approche des surfaces de réponse a été utilisée.

Au cours des années 50 les chimistes Box et Wilson [Nak95] ont développé le concept de surface de réponse en s'appuyant sur les techniques de régression analytique et la conduite d'expériences.

Le choix des variables stimuli et l'affectation de leur poids relatif étaient des points essentiels dans la méthodologie M.S.R durant cette période et elle a été enrichie par la définition des périodes d'observation et les calculs d'erreurs. Une étude détaillée est disponible dans [Sch96] et [Lab97]. L'objectif commun est de chercher la meilleure fonction pour transférer les variabilités d'un ensemble de variables stimuli afin de représenter les variations d'une réponse comme la taille d'un individu, la puissance d'un appareil électrique, le déplacement d'un point . . . etc.

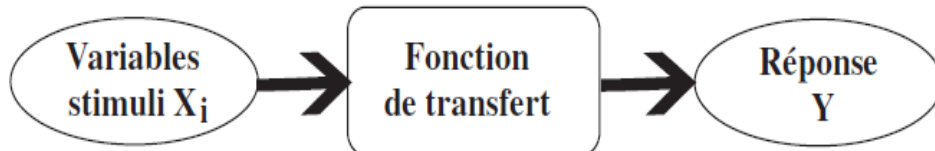
La construction des fonctions de réponse de type analytique, sous certaines conditions de régularité est essentiellement basée sur des formes polynômiales. De nombreux modèles potentiels sont apparus durant les dernières décennies, et le modèle de référence, qui constitue un apport théorique bien structuré, est le modèle optimal sous contraintes dans le cas de fonctions linéaires.

Dans le cas général, on appelle surface de réponse, la représentation géométrique de la réponse d'un processus physique spatio-temporel aléatoire à des variables stimuli. La propriété étudiée, ou réponse  $Y$ , résulte alors du transfert par une fonction de réponse explicite, ou fonction de transfert, des variables d'entrée du système, le changement de valeurs de ces variables entraînant un changement de la valeur de la fonction de réponse. Les modèles expérimentaux des surfaces de réponse prennent en considération le choix des variables stimuli, la définition des périodes d'observation et le calcul d'erreur. Les variables d'entrée, stimuli représentatifs du phénomène, sont notées  $X_i (i = 1; \dots; n)$ , et sont appelées aussi variables de base du phénomène. Elles sont

## Chapitre II : Techniques Expérimentales

caractérisées par un ensemble d'informations statistiques notées  $\mu_j (j = 1; \dots; p)$  (fonctions de distribution indépendantes ou corrélées, moments normalisés, ...). Dans le cas général, les variables  $X_i$  sont des processus spatio-temporels, dits stochastiques ramenés à des vecteurs aléatoires lorsqu'on fixe les indices de temps et d'espace.

Ce transfert des variables stimuli peut être représenté par le schéma de la figure (2.1).



*Figure II. 9 : Schéma d'une fonction de transfert*

En général, la forme explicite de cette fonction de transfert en fonction des variables de base est inconnue, et la recherche d'une approximation, appelée fonction de réponse, devient nécessaire. Le plus souvent, elle appartient à une famille de fonctions usuelles linéaires ou non, caractérisées par des paramètres  $\hat{A}^k (k = 1; \dots; l)$ , aléatoires ou déterministes. L'ajustement de la réponse, basée sur une base de données expérimentales (expérimentation physique ou numérique) et une métrique pour le calcul d'erreur, permet de déduire les paramètres  $\hat{A}^k$ . La représentation géométrique de la fonction de réponse sous la forme d'une courbe, d'une surface ou d'une hyper surface et appelée surface de réponse.

### II.5 Introduction au logiciel JMP :

JMP "John's Macintosh Product" est un logiciel initialement développé par John Sall pour exécuter des analyses de statistiques simples ou complexes.

Le logiciel est conçu pour les ordinateurs personnels et possède des versions adaptées à Windows, Macintosh ou Linux.

JMP fournit un ensemble d'outils statistiques compréhensible, un moyen de mettre en place des expériences et de contrôle qualité statistique dans un seul paquetage logiciel. Il peut fonctionner avec divers formats de données.

### II.6 Mise en application des plans d'expériences

Le plan d'expérience utilisé pour notre cas est un plan composite centré dont un polynôme de 2<sup>ème</sup> degré permettant de donner une bonne modélisation du phénomène étudié. Les paramètres que nous avons eu l'intérêt de les optimiser dans la station d'épuration sont la demande chimique en

## Chapitre II : Techniques Expérimentales

floculant et la turbidité. Nous nous intéressons aux facteurs contrôlables qui agissent le plus fortement sur le traitement, à savoir, la dose du coagulant et la dose du floculant.[52]

Le modèle postulé est donc donné explicitement par :

Avec :

$a_0$  : Effet moyen;

$a_1$  : Effet du coagulant;  $a_2$  : Effet du floculant;

$a_{12}$  : Interaction entre le coagulant et le floculant;

$a_{11}$  : Effet quadratique du coagulant;

$a_{22}$  : Effet quadratique du floculant.

### II.7 Analyse de la variance

L'analyse de la variance (ANOVA) est un outil essentiel dans la détermination de la signification d'un effet ou d'un modèle mathématique. Le principe de l'analyse de la variance est basé sur le calcul de l'écart total entre les différentes mesures  $y_i$  du plan d'expériences et la moyenne de ces mesures [53].

### II.8 Coefficient de détermination ( $R^2$ )

L'analyse de la variance permet de calculer une statistique très utile : le  $R^2$  ou R carré. Cette statistique est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées (corrigées de la moyenne) à la somme des carrés des réponses mesurées (corrigées de la moyenne).

Le  $R^2$  est donc une mesure de la qualité du modèle. S'il est égal à 1, le modèle permet de retrouver la valeur des réponses mesurées. S'il est égal à 0, le modèle n'en dit pas plus que la moyenne des réponses. Le  $R^2$  est donc un bon indicateur de la qualité du modèle s'il y a plus de points expérimentaux différents que de coefficients dans le modèle postulé.

- **Résidus**

C'est la différence entre la réponse mesurée et la réponse calculée.

- **P-value**

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. La P-value est la probabilité qu'un coefficient soit négligeable. On calcule cette P-value à partir du rapport du coefficient à son écart-type. La probabilité d'acceptation des coefficients à une p-value de 0,10

## Chapitre II : Techniques Expérimentales



## **Chapitre III**

### **Résultats et discussions**

# Chapitre III : Résultats et discussions

## III.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats expérimentaux obtenus lors du traitement par coagulation floculation

## III.2 Traitement par coagulation -floculation

Les tests ont été réalisés sur une eau usée (eau cimentaire) avec un coagulant : le chlorure de fer ( $\text{FeCl}_3$ ) et le floculant l'amidon.

L'échantillon de cette eau dont les différents paramètres mesurés sont les suivants :

Turbidité= 18,7 NUT

pH=11,46

T=22,6 C°

Conductivité= 3,02 mS /cm

## III.3 Plan d'expérience

### III.3.1 Détermination des facteurs

L'optimisation de la matrice de formulation d'un modèle à la base d'une combinaison de Coagulant et de floculant, est basée sur deux facteurs qui influencent sur le traitement physicochimique. Nous avons choisi une matrice de l'expérience du plans composite centré qui permet de trouve les quantités optimales permettant de prédire la réponse calculée à tout les pointes du domaine. Les divers facteurs, les variables codées et la matrice du protocole expérimental sont rassemblés dans les tableaux (III.2, III.3).

**Tableau III. 1: Le champ expérimental des facteurs étudiés**

Facteurs	Notation	Quantité		Unité
		Niveau bas (-1)	Niveau haut (1)	
Coagulant	X <sub>1</sub>	0	100	Ppm
Floculant	X <sub>2</sub>	0	100	Ppm

## Chapitre III : Résultats et discussions

**Tableau III. 2: Matrice d'expériences**

Eau usée +FeCl <sub>3</sub> +Amidon							
N	Code des variables		Facteurs		Réponse		
N°	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	amidon	FeCl <sub>3</sub> (ppm)	pH	Conductivité (mS /cm)	Turbidité (NTU)
	1	1	100	100	6,65	2,97	8,9
2	0	0	50	50	10,15	2,66	18,1
3	1	0	100	50	10,11	2,64	12,4
4	-1	-1	0	0	11,46	2,94	18,7
5	-1	1	0	100	8,68	2,78	11,3
6	-1	0	0	50	10,41	2,68	13,2
7	0	1	50	100	7,88	1,16	7,1
8	0	-1	50	0	11,39	2,86	17,8
9	1	-1	100	0	11,61	2,91	15,8

### III.3.2 Analyse statistique des résultats

Le traitement physico-chimique est obtenu en exploitant les mesures de turbidité et de la conductivité sur des échantillons de l'eau polluée. Les résultats montrent après analyse statistique, que le modèle est significatif avec ( $P < 0,05$ ), et par cela la validité du modèle est confirmée. Ce modèle pourrait probablement fonctionner pour le traitement d'eau polluée à partir de la turbidité.

### III.3.3 Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance, montre une valeur de P des effets principaux de 0,0024 ( $< 0,05$ ) pour le pH. Cette valeur indique que le modèle est significatif. C'est-à-dire au moins un facteur a un effet significatif sur la réponse.

Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation ( $R^2$ ), les rapports et les probabilités p-value des réponses étudiées (turbidité et pH) sont regroupés dans les tableaux III-4., III-5. Respectivement :

## Chapitre III : Résultats et discussions

Selon **Goupy**, le  $R^2$  est un paramètre qui nous indique la validité du modèle étudié, le coefficient de détermination de ce modèle est égale à ( $R^2 = 0.99$ ), et la valeur du coefficient de détermination ajustée est de  $R^2 = 0.83$ .

Le graphe (figure III-4), confirme que la courbe de valeur observée en fonctions des valeurs prévues, à très proche a l'allure d'une droite, on constate l'accord étroit qui, existe entre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques prévues par le modèle polynomial.

Comme c'est indiqué dans les tableaux III-6, III-7 et les figures III-7 les coefficients de corrélations des modèles postulés sont généralement relativement élevés ( $R^2 = 0,83$  pour Turbidité). Ceci montre une bonne corrélation entre les réponses obtenues par les simulations et les valeurs prédites par les modèles ainsi trouvés.

### 1) Réponse pH

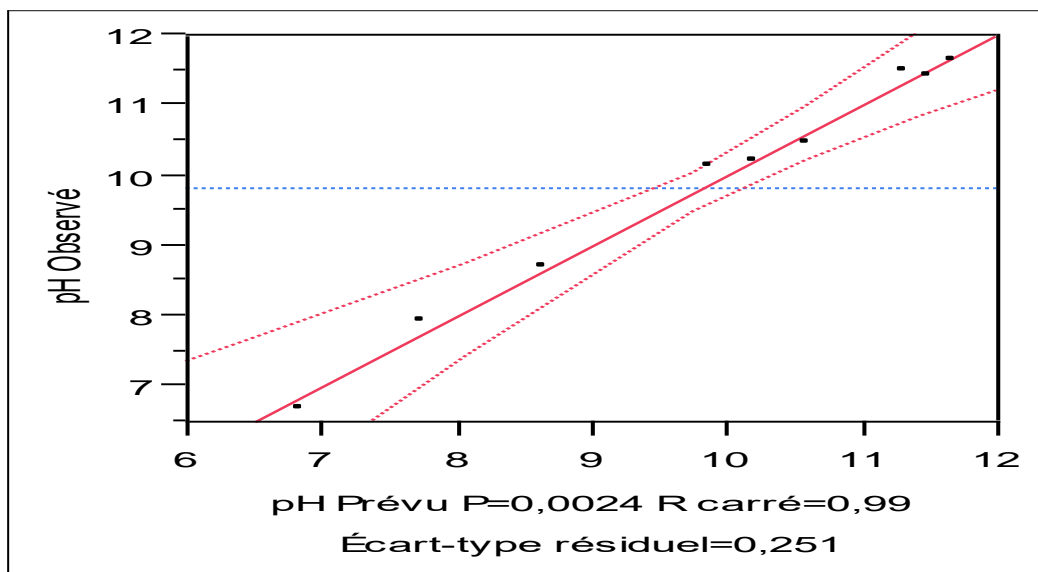


Figure III. 1: Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

Tableau III. 1: Résumé de l'ajustement

R carré	0,992126
R carré ajusté	0,979002
Écart-type résiduel	0,25105

## Chapitre III : Résultats et discussions

Moyenne de la réponse	9,815556
Observations (ou sommes pondérées)	9

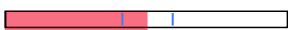
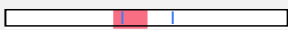

*Tableau III. 2: Analyse de la variance*

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	23,822544	4,76451	75,5960
Résidus	3	0,189078	0,06303	<b>Prob. &gt; F</b>
Total	8	24,011622		0,0024

*Tableau III.3: Estimations des coefficients*

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	10,214444	0,187121	54,59	<,0001
FeCl3(0,100)	-1,875	0,102491	-18,29	0,0004
Amid(0,100)	-0,363333	0,102491	-3,55	0,0382
FeCl3*Amid	-0,545	0,125525	-4,34	0,0226
FeCl3*FeCl3	-0,611667	0,177519	-3,45	0,0411
Amid*Amid	0,0133333	0,177519	0,08	0,9449

*Tableau III. 4 : Estimations des coefficients triés*

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Rapport t	Prob.> t
FeCl3(0,100)	-1,875	0,102491	-18,29		0,0004
FeCl3*Amid	-0,545	0,125525	-4,34		0,0226
Amid(0,100)	-0,363333	0,102491	-3,55		0,0382

## Chapitre III : Résultats et discussions

FeCl <sub>3</sub> *FeCl 3	-0,611667	0,177519	-3,45		0,0411
Amid*Amid	0,0133333	0,177519	0,08		0,9449

### Surface de réponse

Coefficient	FeCl <sub>3</sub> (0,100)	Amidon(0,100)	pH
FeCl <sub>3</sub> (0,100)	-0,611667	-0,545	-1,875
Amidon(0,100)	.	0,0133333	-0,363333

Valeur prévue à la solution

11,237992

#### a) Les surfaces de réponses et les courbes iso-réponse

Les surfaces de réponses et les courbes iso-réponse permettent de restituer de manière interprétable les équations des modèles comme illustrer sur les figures, III-6 et III-9

Ces figures permettent de visualiser l'évolution de pH et la turbidité en fonction des facteurs retenus sur toute la plage expérimentale. On peut ainsi titrer directement à partir de ces graphiques, la valeur estimée du paramètre désiré, à n'importe quel point du domaine d'étude.

#### b) Etude des interactions

La conception du RSM identifie à la fois les interactions linéaires et les contributions quadratiques des variables indépendantes aux propriétés traitement physico-chimique.

Les figures III.6, III.9 montrent les courbes des contours pour l'effet des variables indépendantes sur la turbidité et le pH. Comme le montre les tableaux III-6, III-9, la turbidité était positivement liée à l'effet linéaire de la concentration..... ( $p < 0.05$ ).

Le pH dépend de la concentration de coagulant et de flocculant où les effets linéaire ( $p < 0.05$ ) respectivement, et l'interaction ( $p < 0.05$ ) sont significativement affectés par la concentration de FeCl<sub>3</sub> et celle de l'amidon.

## Chapitre III : Résultats et discussions

### b) Optimisation

L'analyse des résultats, avec une désirabilité de la turbidité et le pH, nous aide à trouver les réglages des paramètres de traitement des eaux usées. On peut ainsi tirer directement à partir de ces graphiques, la valeur estimée du paramètre désiré, à n'importe quel point du domaine d'étude.

#### -Profileur de prévision

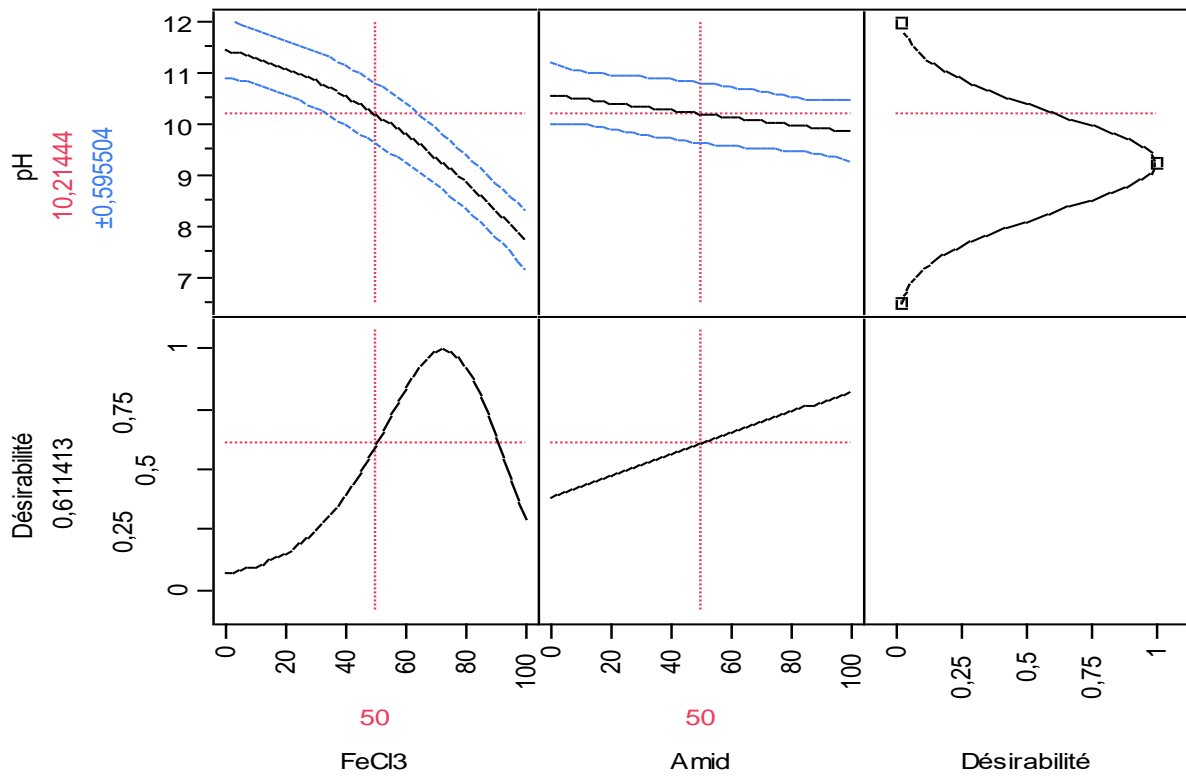
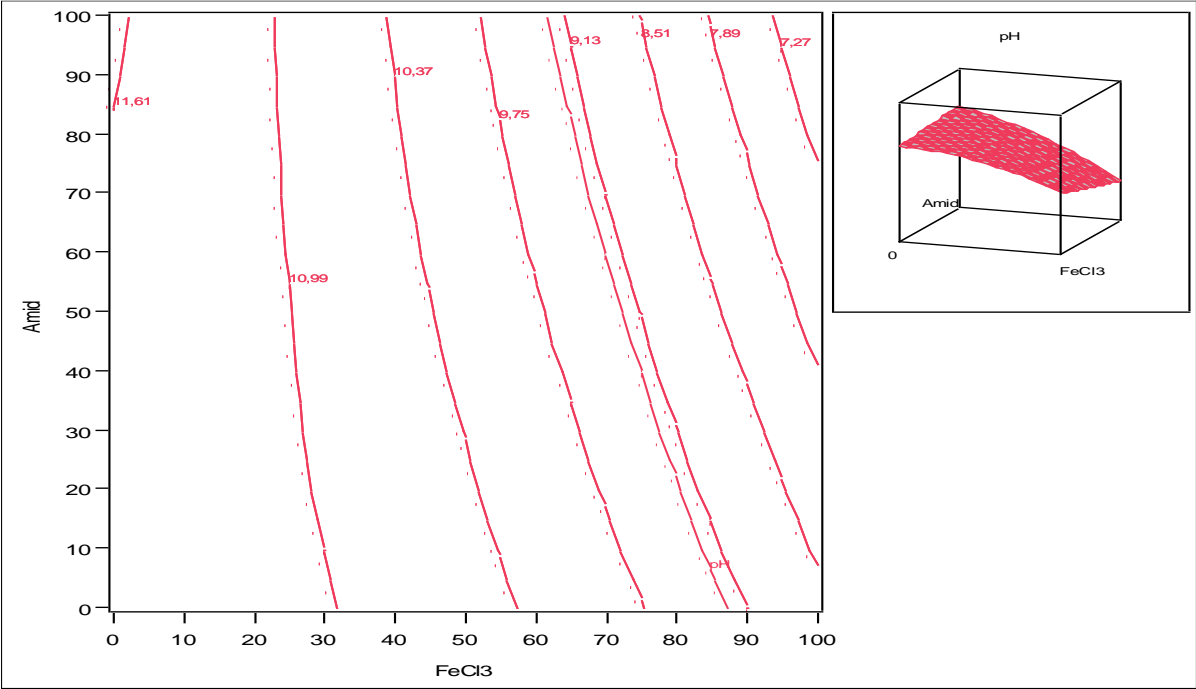
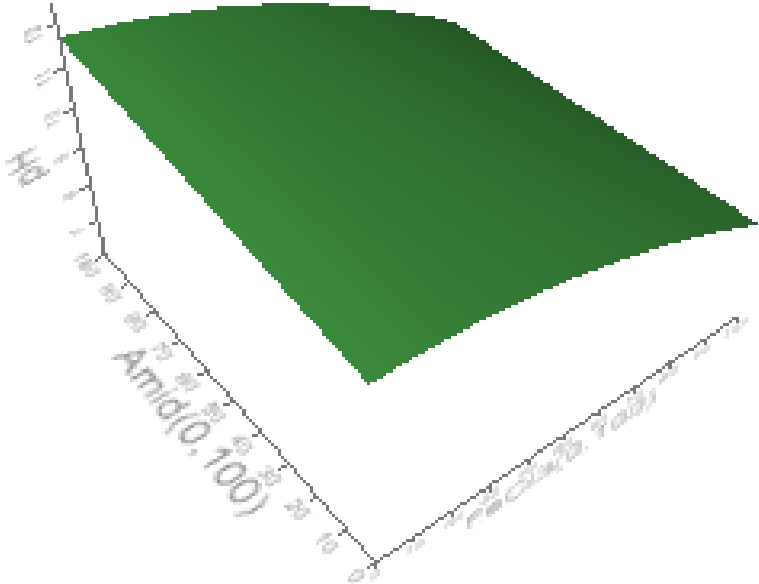


Figure III. 2: Fonction de désirabilité de l'optimisation

# Chapitre III : Résultats et discussions



Courbes d'iso-réponse



Surface de réponse

Figure III. 3 : Variation de la réponse pH dans le plan coagulant, floculant.



## Chapitre III : Résultats et discussions

### 2) Réponse Turbidité

Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

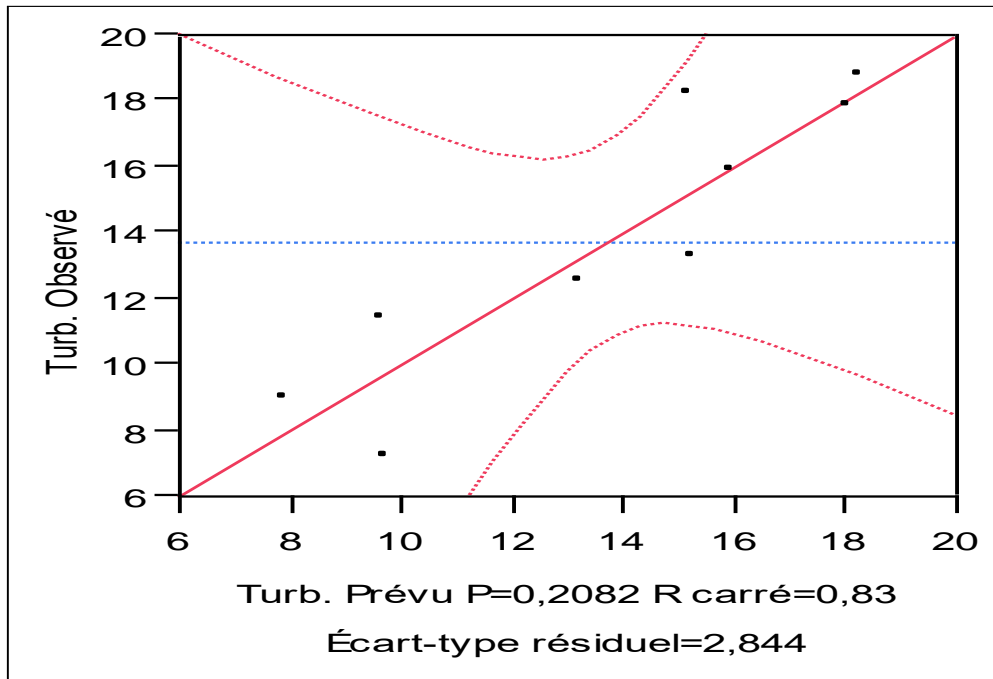


Figure III. 4: Variation de la réponse pour la turbidité dans le plan coagulant flocculant

#### -Résumé de l'ajustement

R carré	0,826536
R carré ajusté	0,537429
Écart-type résiduel	2,843951
Moyenne de la réponse	13,7
Observations (ou sommes pondérées)	9

#### -Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	115,61583	23,1232	2,8589

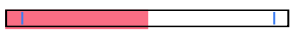
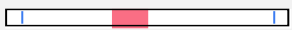

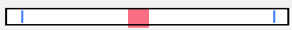

## Chapitre III : Résultats et discussions

Résidus	3	24,26417	8,0881	<b>Prob. &gt; F</b>
Total	8	139,88000		0,2082

### -Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	15,2	2,119756	7,17	0,0056
FeCl3(0,100)	-4,166667	1,161038	-3,59	0,0371
Amidon(0,100)	-1,016667	1,161038	-0,88	0,4457
FeCl3*Amidon	0,125	1,421975	0,09	0,9355
FeCl3*FeCl3	-1,3	2,010977	-0,65	0,5640
Amidon*Amidon	-0,95	2,010977	-0,47	0,6689

### -Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Rapport t	Prob.> t
FeCl3(0,100)	-4,166667	1,161038	-3,59		0,0371
Amidon(0,100)	-1,016667	1,161038	-0,88		0,4457
FeCl3*FeCl3	-1,3	2,010977	-0,65		0,5640
Amidon*Amidon	-0,95	2,010977	-0,47		0,6689
FeCl3*Amidon	0,125	1,421975	0,09		0,9355

# Chapitre III : Résultats et discussions

## -Profil de prévision

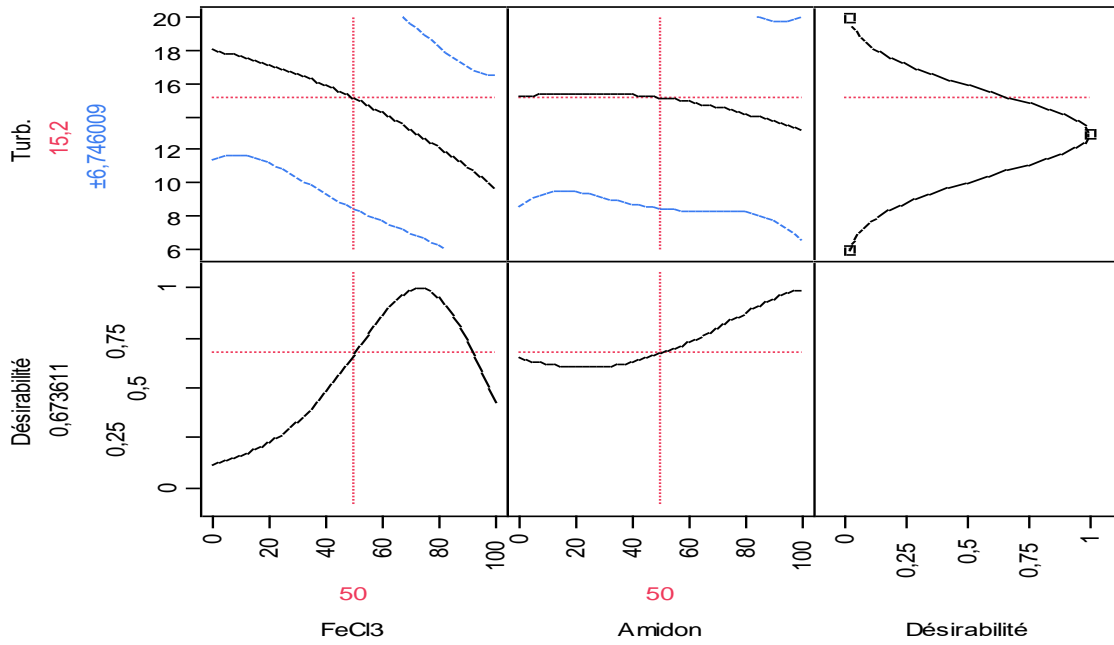
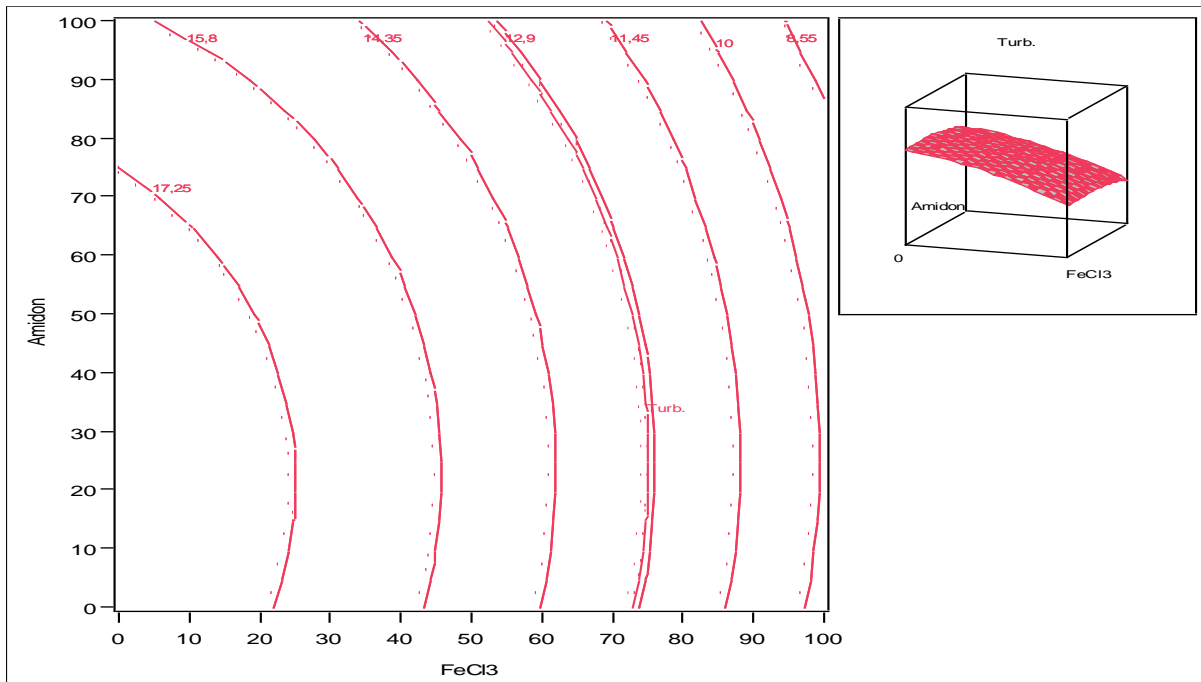
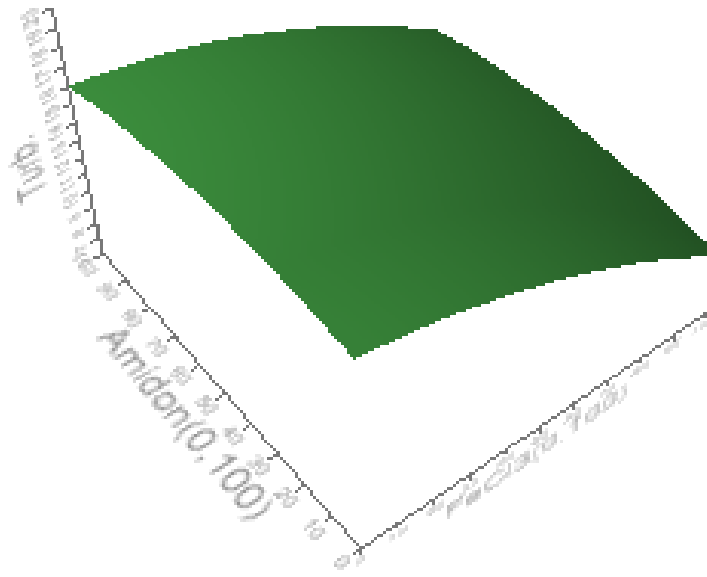


Figure III. 5: Fonction de désirabilité de l'optimisation



Courbes d'iso-réponse

## Chapitre III : Résultats et discussions



Surface de réponse

**Figure III. 6 : Variation de la réponse pour la turbidité dans le plan coagulant flocculant**

D'après les résultats obtenus, on remarque que les graphes obtenues (figure III-7, III-8 et III-9) confirme que la courbe de valeurs observées en fonctions des valeurs prévues, sont loin à l'allure d'une droite pour la turbidité, donc il existe une différence entre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques prévues par le modèle polynomial; cela signifie que le modèle n'est pas valide.

## Conclusion générale

Ce travail est consacré à une étude systématique pour établir une optimisation du traitement de l'eau cimentaire. Cette étude a pour but de minimiser les essais et le cout des produits utilisés.

Les résultats obtenus par le traitement coagulation floculation sont traité à l'aide du logiciel JMP 7.0. Le plan d'expériences est utilisé pour établir une étude systématique ; Deux facteurs contrôlables (quantité de coagulant, et quantité de floculant) sont retenus pour trouver les réponses les paramètres physico-chimiques: pH, la conductivité et la turbidité qui représente un problème principal des eaux.

L'analyse systématique indique que le model est vérifié pour les paramètres conductivité et pH mais non vérifié pour la turbidité.

## Références

- [1]: GUESBAYA N. (1998). *Élimination des composés organiques par le procédé de coagulation-floculation*. Mémoire de Magister en sciences hydrauliques, Université de Biskra, Algérie, 98 p.
- [2]: AsmaaSALMI.,Nesrine MERAIR.(2014). Etude De La Biodégradation Des Eaux Usées Dans Le Réacteur A Batch Séquentiel Et L'impact Du Solvant Furfural Dans Le Traitement Biologique. Mémoire De Master .Université Mohamed Boudiaf D'Oran.
- [3] Khemaissia, S., Benturki, A., Bendjeriou, F., Benyounes, H., &Berrached, A. Traitement des effluents uranifères par procédé d'adsorption sur le matériau zéolithe KLTL.
- [4] <http://fr.ekopedia.org/Eau>.consulté le 19/03/2012.
- [5] MicrosoftEncarta2007.
- [6]<http://fr.wikipedia.org/wiki/Eau>.consulté le 19/03/2012.
- [7] La Commission Locale de l'Eau., 2004 :Rendement des réseaux d'eau potable ; définition des termes utilisés ; version juin 2004 ;([www.sage-nappes33.org/index2.php?option=com\\_docman...74](http://www.sage-nappes33.org/index2.php?option=com_docman...74) ).
- [8] LehababS. et al., 2004 : Contribution à l'étude de l'eau potable .Mémoire d'ingénieur d'états en écologie végétale et environnement, Université de Sidi Bel Abbés.
- [9] DesjardinsR., 1997 : Traitement des eaux ; Edition de l'école polytechnique de Montréal, 2ème édition revue et améliorée.
- [10] Les études de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne., 2005 : Connaissance et maîtrise des pertes dans les réseaux d'eau potable ([www.eau-adour-garonne.fr](http://www.eau-adour-garonne.fr)).
- [11] : Monique Henry : Les eaux naturelles et les eaux de consommation Saint Laurent1991
- [12] : R. KHIMOUD et H. KHENNANE, Analyse physico-chimique et bactériologique de l'eau brute et de l'eau traitée de Barrage « TAKSEBET » Tizi-Ouzou, mémoire de fin études en écologie Végétale et environnement, Université Mouloud Mammeri, Tizi – Ouzou, 2011.

- [13] : Jean Juc Celleric: La dégradation de la qualité de l'eau dans le réseau, Paris 2002
- [14] : Ramade F., 1998. Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. Ed inscience internationale, Paris, 786p
- [15] : Bremond R, Vuichard R., 1973. Paramètres de la qualité des eaux, OSPEPE, Paris].
- [16] : Rodier J., 2009. Analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduaires. Eau de mer. 9ème édition. Ed. Dunod bordas, Paris. 1526 p.]
- [17] Saïd Ouali M., 2001 : Cours de procédés unitaire biologique et traitement des eaux ; Office des publications universitaires ; 1 place centrale de Ben-Aknoun(Alger).
- [18] Eau: Généralité <http://sixpiedssurterre.over-blog.com/article-eau-generalites-68730704.html>: les états de l'eau .consulté le 19/03/2012.
- [19] Saïd Ouali M., 2001 : Cours de procédés unitaire biologique et traitement des eaux ; Office des publications universitaires ; 1 place centrale de Ben-Aknoun(Alger).
- [20] <http://www.u-picardie.fr/>. Consulté le 19/03/2012.
- [21] DEGUMENT., 2005 : Mémento technique de l'eau, Tome I, Lavoisier, Paris.
- [22] Gérard Copin-Montégut ; Propriétés physiques de l'eau de mer. [http://www.obs-vlfr.fr/enseignement/enseignants/copin/prophy\\_imp.pdf](http://www.obs-vlfr.fr/enseignement/enseignants/copin/prophy_imp.pdf) .consulté le 23/03/2012.
- [23] DEGUMENT., 1972 : Mémento technique de l'eau, Lavoisier, Paris
- [24] Rodier J. et coll., 2005 : L'analyse de l'eau ; eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8ème édition. Dunod, Paris.
- [25] Bordet J., 2007 : L'eau dans son environnement rural ; édition Johanet.
- [26] Chabni L., 2005 : mémoires de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique. Option : conception des systèmes d'alimentation en eau potable. Thème : Etude de la propagation des polluants dans les eaux souterraines. Ecole Nationale Supérieure de L'hydraulique ENSH-BLIDA.
- [27] Lallemand B., 1995 : Méthodes de dépollution des eaux souterraines. Édition BRGM.
- [28] [http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/degrillage.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/degrillage.php4) consulté le 7/04/2012.
- [29] Metiche M., 2004: Environnement. Phénomènes de pollution et techniques de protection. Publication : Centre Universitaire de Béchar. Octobre 2004.

- [30] <http://membres.multimania.fr/valerian88/aqua01.htm>; Consulté le 19/03/2012.
- [31] Souikni N. et Seghioer N., 2006 : Contribution à l'étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans le grand Tlemcen (Tlemcen-Mansourah-Chetouane), Mémoire pour l'obtention du diplôme DEUA en Hydraulique, Département d'Hydraulique, Faculté des sciences de l'Ingénieur, Université AbouBekrBelkaïd, Tlemcen.
- [32] DERGERONT. Mémento techniques de l'eau. Edition : techniques et documentation, paris.(1984)
- [33] DEGREMONT. Mémento techniques de l'eau. Edition : techniques et documentation, paris.(1989)
- [34] : Monique Henry : Les eaux naturelles et les eaux de consommation Saint Laurent 1991
- [35] : R. KHIMOUD et H. KHENNANE, Analyse physico-chimique et bactériologique de l'eau brute et de l'eau traitée de Barrage « TAKSEBET » Tizi-Ouzou, mémoire de fin études en écologie Végétale et environnement, Université Mouloud Mammeri, Tizi – Ouzou, 2011.
- [36] : Bremond R, Vuichard R., 1973. Paramètres de la qualité des eaux, OSPEPE, Paris].
- [37] : Ramade F., 1998. Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. Ed inscience internationale, Paris, 786p
- [38] : Jean JucCelleric: La dégradation de la qualité de l'eau dans le réseau, Paris 2002
- [39] : Rodier J., 2009. Analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduaires. Eau de mer. 9ème édition. Ed. Dunod bordas, Paris. 1526 p.]
- [40] CAMP, T.R., ROST, D.K., and BHOSTA, B.V. Effects of temperature on the rate of floc formation, Journal. (1940)893- 901
- [41] Journal officiel de la république algérienne. N° 18 eau potable. 2011.
- [42] (Fadilet *al.*, 2015)
- [43] (Rabier, 2007).
- [44] (Goupy, 1999)
- [45] (Benoits et *al.*, 1994).
- [46] (Goupy, 2006).
- [47] (AnnexeB) (Goupy, 2006)
- [48] (Karam, 2004)



- [49] (Pengpeng, 2014).
- [50] (Harris et Hopkinson, 1976)
- [51] (Goupy et Creighton, 2001)
- [52] W. Tinsson, 'Plans d'Expérience: Constructions et Analyses Statistiques, Mathématiques et Applications', Vol. 67, 532 p, Springer ISBN : 978-3-642-11471-7, 2010.
- [53] Angellier, H. Thèse doctorat. Nanocristaux d'amidon de maïs cireux pour applications aux composites. Université Grenoble 1, 2005.