



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie de l'Environnement

Projet de fin d'études

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME DE : Master

Filière : Génie des procédés

Option : Génie de procédés de l'environnement

THEME

Etude et optimisation de l'efficacité de gel des grains de Nasturtium officinale dans le traitement de l'eau

Préparé par : Mlle. BECHAR Sara

A. Messis	Président	M.C.A	Université de Bordj BouArréridj
N. Magharaoui	Rapporteur	M.A.A	Université de Bordj BouArréridj
M. Merzougui	Examineur	M.C.B	Université de Bordj BouArréridj

Année Universitaire 2020-2021

Dédicace

Avec l'aide et la protection d'ALLAH

s'est réalisé ce modeste travail

Je dédie ce travail à :

Mon PÈRE et ma MÈRE

Toute ma famille

Mes amis

Mes camarades de promo Génie de procédés de

l'environnement

Et tous ceux qui ont connu Bechar Sara

Remerciements

Je tiens à remercier Allah qui nous a donné le courage, la patience et la capacité de mener ce travail à terme.

*Je témoigne ma profonde gratitude, mes profonds et sincères remerciements à **MME MAGHRAOUI** mon promoteur et **MME FAID** mon Co-promoteur pour leur orientation, leur efforts et leur patience fournis durant ce travail.*

Je remercie également les membres du jury pour avoir acceptés d'apporter leur contribution à notre travail.

SARA

Tables des matières

Liste des Tableaux	I
Liste des Figures	II
Introduction	1
Chapitre 1 : Revue bibliographique	
I. Propriétés et pollution des eaux	
I.1. Introduction	1
I.2. Propriétés de l'eau	3
I.2.1. Propriétés physiques	3
I.2.2 Propriétés chimiques	3
I.2.3 Propriétés biologiques de l'eau	4
I.3. Origine et différents types d'eau	5
I.4. Paramètres caractéristiques de la qualité des eaux	7
I.4.1. Propriétés organoleptiques (La Couleur, Gout et odeur, Turbidité)	7
I.4.2. Caractères physico-chimiques (Température, Potentiel d'hydrogène, Salinité, Les résidus secs à 180°C, Dureté ou titre hydrométrique (TH), Conductivité électrique, Alcalinité Titre alcalimétrique (TA) ou titre alcalimétrique complet (TAC), Chlorure, Autres principaux éléments présents dans l'eau)	7
I.4.3. Paramètres indésirables ou toxiques (Fer et manganèse, Métaux lourds)	9
I.4.4. Les paramètres microbiologiques	9
I.5. Pollution des eaux	10
I.5.1. Définition	10
I.5.2. Origine de la pollution	10
I.5.3. Les différents polluants présents dans les eaux usées	11
II. Coagulation-Floculation	
II.1.Introduction	15
II.2.Le procédé de coagulation-floculation	15
II.2.1. La coagulation	15
II.2.2. La floculation	15
II.2.3. La coagulation-floculation	15
II.3. Les matières en suspension et colloïde	16
II.3.1.Les suspensions colloïdales	16
II.3.2.Décantation des suspensions colloïdales	18

II.4. Théorie de la double couche.....	18
II.5. Phénomène de coagulation.....	19
II.6. Phénomène de floculation	21
II.7. Les étapes de l'agrégation.....	21
II.8. Les coagulants.....	22
II.9. Choix du coagulant	24
II.10. Facteurs influençant la coagulation.....	25
III. Choix du flocculant (graines de cresson)	
III.1. Définition.....	27
III.2 Les vertus du cresson.....	27
III.3. Composition du cresson comme aliment.....	28
IV .Le plan d'expériences	
IV .1. Définition.....	28
IV .2. Objectif du plan d'expériences	28
Chapitre II : Méthodes et Matériel	
II.I. Introduction	30
II.2. Dispositifs expérimentaux pour la coagulation-floculation	30
II.2.1. Jar-Test.....	30
II.2.1.1. L'échantillonnage	30
II.2.1.2. Déroulement de l'expérience.....	30
II.2.2. Méthodes d'analyse.....	31
II.2.2.1. Mesure de la turbidité.....	32
II.2.2.2. Mesure de la conductivité.....	32
II.2.2.3. Mesure du Ph.....	33
II.3. Méthode basée sur les plans d'expériences.....	34
II.3.1. Introduction.....	34
II.3.2. Les objectifs des plans d'expérience.....	34

II.3.3. Principe	34
II.3.4. Mise en application des plans d'expériences	36
Chapitre III. Résultats et discussions	
III.1. Introduction.....	38
III.2.Traitement par coagulation-floculation.....	38
III.2.1.Les eaux naturelles	38
III.2.2. Les eaux Usées	40
III.3. Les plans d'expériences.....	42
III.3.1. Les eaux Usées.....	42
III.3.2. Les eaux naturelles.....	49
Conclusion	55

Références

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de Stokes

Tableau I.2. Les étapes de l'agrégation

Tableau II.3 : Dérivés de sel de fer

Tableau III.1. Valeurs du pH, conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson et le FeCl_3 .

Tableau III.2. Valeurs du pH, conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson et le Nitrate d'Aluminium ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$).

Tableau III.3. Valeurs du pH, conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson et le FeCl_3 .

Tableau III.4. Valeurs du pH, conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson et le Nitrate d'Aluminium ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$)

Tableau III.5. Le champ expérimental des facteurs étudiés

Tableau III.6. Matrice d'expériences

Tableau III.7. Analyse de la variance du modèle obtenu

Tableau III.8. Résumé de l'ajustement et estimations des coefficients de la réponse pH selon le critère de la méthode d'analyse utilisée

Tableau III.9. Résumé de l'ajustement et estimations des coefficients de la réponse Turbidité

Liste des figures

Figure I.1. Phénomène de coagulation-floculation

Figure I.2. Représentation de colloïde hydrophile

Figure I.3 Représentation schématique de la compression de la couche diffuse.

Figure I.4 Représentation schématique de neutralisation des charges

Figure I.5 Adsorption et pontage à l'aide d'un polymère

Figure I.6 Le sulfate ferrique en poudre

Figure I.7 Le chlorure ferrique en poudre

Figure I.8 Le sulfate d'aluminium en poudre

Figure II.1. Les étapes de préparation du gel.

Figure II.2. Jar test (floculateur).

Figure II.3. Turbidimètre

Figure II.4. Conductimètre

Figure II.5. pH-mètre

Figure.II.6. Exemple d'une surface de réponses issues d'un domaine d'étude de deux facteurs

Figure III.1. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la turbidité et pH

Figure III.2. Variation de la réponse de pH dans le plan coagulant, floculant

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

Figure.III.4. Fonction de désirabilité de l'optimisation (Turbidité, pH)

Figure III.5. Réponses théoriques en fonction des réponses estimées

Figure III.6. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, Fonction de désirabilité de l'optimisation et Variation de la réponse de PH.

Figure III.7. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, Fonction de désirabilité de l'optimisation et Variation de la réponse de la turbidité

Figure III.8. Réponses théoriques en fonction des réponses estimées.

Figure III.9. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, Fonction de désirabilité de l'optimisation et Variation de la réponse de PH

Figure III.10. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, Fonction de désirabilité de l'optimisation et Variation de la réponse de turbidité

Introduction

Introduction

La protection de l'environnement est un problème majeur pour l'humanité. Un volet important et vital concerne la préservation des ressources en eaux, en effet ces dernières sont menacées par une pollution diffuse et multiforme aggravée par le progrès dans le bien être de l'homme, une industrialisation sauvage et une démographie galopante.

Les activités humaines représentent une source de pollution très importante et contribuent d'une façon certaine à la détérioration de l'environnement et de la santé publique. En effet, elles génèrent des effluents souvent chargés de polluants peu ou non biodégradables. Ces activités génératrices de pollution couvrent plusieurs domaines comme : l'industrie, l'agriculture.....etc[1].

La présence de matière polluantes dans nos rejets quotidiennes peut constituer une menace sérieuse pour l'environnement quand ils sont rejetés directement sans traitement préalable dans le milieu naturel. Un traitement sera donc indispensable pour éliminer ces matières néfastes à l'environnement.

Une technique de traitement adéquate doit assurer une bonne efficacité dans le traitement des eaux. De plus que les méthodes traditionnelles de traitement ne répondent pas à cette exigence, elles sont aussi très coûteuses. Pour cela le recours à de nouveaux procédés prometteurs et moins coûteux est à entreprendre. Sur lequel se focalise de notre travail, qui consiste à l'application de la méthode de coagulation-floculation effectuée au jar-test en utilisant deux coagulants le premier est le chlorure de fer (FeCl_3) et le second est le nitrate d'aluminium ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$), et un floculant naturel (graine de cresson), pour diminuer la turbidité de l'eau.

L'objectif essentiel des tests coagulation-floculation consiste à l'évaluation de l'efficacité de l'utilisation de mucilage des graines de cresson comme floculant naturel dans la clarification de l'eau.

Pour présenter le travail réalisé, nous l'avons scindé en trois chapitres :

- Le premier chapitre rappellera quelques généralités sur la pollution des eaux, les différents types de la pollution des eaux, le procédé de coagulation-floculation et les méthodes de traitement.

Introduction

- Le deuxième chapitre est consacré à présenter une description du matériel et de la méthodologie suivis.
- Dans le troisième chapitre nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus discutés et interprétés.

Enfin on termine par une conclusion générale, résumant l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail.

Chapitre I

Revue

Bibliographique

I. Propriétés et pollution des eaux

I.2. Propriétés de l'eau

Indispensable à la vie, catalyseur de nombreuses réactions chimiques, l'eau est également le principal agent d'érosion et sédimentation et donc un facteur déterminant de la formation des paysages. Sur la terre, l'eau existe dans les trois états : liquide (eau proprement dite), solide (glace) et gazeux (vapeur d'eau). Ces trois phases coexistent dans la nature, toujours observables deux à deux, et plus ou moins en équilibre : eau- glace, eau- vapeur, glace-vapeur selon les conditions de température et de pression [2].

I.2.1. Propriétés physiques

Le caractère polaire de la molécule d'eau est à l'origine d'associations possibles entre les molécules d'eau ; il donnera lieu à bien des anomalies physiques que nous signalons brièvement, telles que :

I.2.1.1. La Température d'ébullition: anormalement élevée, si on la compare avec celle des composés de masse moléculaire du même ordre et possédant plusieurs atomes d'hydrogène. Dans les conditions normales elle est de 100°C.

I.2.1.2. La masse volumique : elle varie avec la température et la pression, mais aussi avec la teneur en sels dissous. L'eau a une masse volumique de 1g/cm³.

I.2.1.3. La viscosité : elle diminue lorsque la température croît ; par contre, elle augmente avec la teneur en sels dissous. Contrairement aux autres liquides, une pression modérée, rend l'eau moins visqueuse aux basses températures [2].

I.2.1.4. La tension superficielle : elle est définie comme une force de traction qui s'exerce à la surface du liquide en tendant toujours à réduire le plus possible l'étendue de cette surface. Elle est extrêmement élevée ; égale à 73erg/cm à 18°C [3].

I.2.2 Propriétés chimiques

L'énergie de formation de la molécule d'eau est élevée (242 kJ/mol). Il s'ensuit que l'eau possède une grande stabilité. Cette stabilité, associée aux propriétés électriques et à la constitution moléculaire de l'eau, la rend particulièrement apte à la mise en solution de nombreux corps gazeux, liquides polaires, et surtout solides. La plupart des substances minérales peuvent se dissoudre dans l'eau, ainsi qu'un grand nombre de gaz et de produits organiques. La solvation (ou action hydratante de l'eau) est le résultat d'une destruction complète ou partielle des divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du corps à dissoudre, pour les remplacer par de nouveaux liens avec les molécules d'eau, et forger ainsi des nouvelles structures [2-3].

I.2.2.1 Eléments majeurs : origine et teneur

➤ **Magnésium (Mg^{2+}) :**

D'un point de vue chimique, le magnésium s'apparente au calcium ; il est donc souvent présent dans les roches carbonatées, les roches évaporiques (sels de magnésium $MgSO_4$), et les roches magmatiques. Les minéraux magnésiens sont moins solubles que les minéraux contenant du calcium. Dans les roches carbonatée magnésiennes (exemple : dolomie), les concentrations en Mg^{2+} sont de l'ordre de quelque dizaines de mg/l. Les aquifères évaporitiques riches en minéraux magnésien peuvent contenir de forte teneur en magnésium, de quelques centaines de mg/l à quelque g/l. dans les roches magmatiques les concentrations sont généralement plus faibles, de quelques mg/l à quelques dizaines de mg/l [4].

➤ **Sodium et potassium (Na^+ , K^+) :**

Le sodium et le potassium les 6ème et 7ème éléments les plus abondants à l'état naturel sont en proportions très variables. Aucune norme ne limite la concentration en sodium (ou en potassium) dans les eaux potables. On peut également signaler que le sodium joue un rôle important en agriculture pour l'irrigation, du fait de son action sur la perméabilité des sols. Le potassium, beaucoup moins abondant que le sodium, et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieurs à 20 mg/l. Il ne représente aucun inconvénient particulier bien que le potassium soit une des sources possibles de radioactivité de l'eau [5-6].

➤ **Les sulfates (SO_4^{-2}) :**

Dans les nappes libres, la présence de sulfate est généralement liée à l'oxydation de pyrite [FeS_2] : minérale riche en soufre que l'on rencontre dans tous les types de lithologie (Calcaire, sable, roches magmatiques). Dans ce contexte, les concentrations en sulfate sont de l'ordre de quelques mg/l à quelques dizaines de mg/l. Dans les nappes captives, le soufre est également présent mais sous sa forme réduite [H_2S]. Les sulfates peuvent également provenir du lessivage de formations évaporitiques, exp : gypse [$CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$]. Dans ce cas les teneurs en sulfates sont très fortes (quelques centaines de mg/l à quelques g/l) [4].

I.2.3 Propriétés biologiques de l'eau

L'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone contribuent à créer des conditions favorables au développement des êtres vivants [7]. Il existe un cycle biologique, cycle au cours du quel s'effectue une série d'échanges; l'eau entre pour une grande part dans la constitution des êtres vivants.

I.3. Origine et différents types d'eau

Sans rentrer dans les détails de l'origine des eaux et les relations entre leur composition, nous pouvons envisager selon le mode de gisement, deux sources principales d'eau :

- Les eaux superficielles : les eaux des oueds, des lacs, des océans et des mers ;
- Les eaux souterraines accumulées dans les nappes.

Et sans empiéter encore sur les études particulières portant sur les types d'eau, lesquelles établissent précisément une certaine corrélation entre composition et origine, nous pouvons distinguer

- les eaux naturelles
- Les eaux potables
- Les eaux douces
- Les eaux dures
- Les eaux de marais
- Les eaux saumâtres
- Les eaux salées.

I.3.1. Eaux naturelles

Les réserves disponibles d'eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltration, nappes), des eaux de surface stagnantes (lacs, retenues de barrage) ou en écoulement (rivières, fleuves) et des eaux de mer.

I.3.2. Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol et se caractérise par une turbidité faible ou leurs eaux bénéficient de filtration naturelle importante. Comme elle se caractérise par une contamination bactérienne faible, car elle est habituellement à l'abri des sources de pollution. Par conséquent la dureté est souvent élevée, et les eaux souterraines peuvent être en contact avec des formations rocheuses contenant des métaux bivalents comme le calcium ou magnésium. En plus, dans les eaux souterraines, le fer et le magnésium présentent une concentration élevée [8].

I.3.3. Eaux de surfaces

Par opposition aux eaux souterraines, l'eau de surface est l'eau qui se trouve à la surface ou proche de la surface du sol. Dans une zone donnée, il s'agit pour l'essentiel des cours d'eau, des océans, des lacs et des eaux de ruissellement qui s'y trouvent. Sa température varie en fonction du climat et des saisons. Ces matières en suspension sont variables selon la

pluviométrie, la nature et le relief des terres à son voisinage. Sa composition en sels minéraux est variable en fonction du terrain, de la pluviométrie et des rejets. Une eau de surface est ordinairement riche en oxygène et pauvre en dioxyde de carbone [8]

I.3.4. Eaux potables

La notion de potabilité est liée directement à l'alimentation humaine. Une eau naturelle est dite potable si elle présente les qualités suivantes :

fraîcheur et limpidité

- absence d'odeur et de couleur
- goût agréable
- suffisamment douce, aérée
- minéralisation raisonnable
- absence de matières organiques et de germes pathogènes [8].

I.3.5. Eaux douces

On parle d'eau douce par opposition aux eaux salées et aux eaux dures .

I.3.6. Eaux dures

Une eau dure incruste à froid ou à chaud les récipients qui la contiennent. La dureté est engendrée par la présence des ions calcium ; magnésium, et un à degré moindre le fer et l'aluminium .

I.3.7. Eaux de marais

Les eaux de « marais » ou « tourbier » sont des eaux douces caractérisées par une faible valeur de pH, due à la présence d'acides organiques et qui les rend très corrosives. On les appelle parfois « eaux rouges » en raison de la présence des particules à base d'oxyde de fer en suspension .

I.3.8. Eaux de mers et eaux saumâtres

La salinité observée dans les différents océans ou mers du globe résulte d'un équilibre entre évaporation, pluies et apport des fleuves (salinité faible) d'une part et d'échange d'eau avec les autres mers ou océans auxquels ils sont reliés d'autre part. [8].

Une eau saumâtre : est une eau dont la teneur en sel est sensiblement inférieure à celle de l'eau de mer. La concentration totale de sel dissous y est généralement comprise entre 1 et 10 g/l alors qu'elle est (en moyenne) de 35 g/l pour l'eau de mer. Dans les estuaires maritimes, la conjonction des courants d'eau douce avec l'eau de mer donne naissance à des poches d'eau saumâtre.

I.4. Paramètres caractéristiques de la qualité des eaux

Les qualités admises d'une eau d'alimentation impliquent la garantie de son innocuité vis-à-vis de l'homme qui est appelé à la consommer. Une eau potable doit présenter un certain nombre de caractères physiques, chimiques et biologiques et répondre, à certains critères essentiels (incolore, insipide, inodore...) appréciés par le consommateur. Toutefois, ses qualités ne peuvent pas se définir dans l'absolu, ni d'une manière inconditionnelle. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a édicté des normes internationales pour l'eau de boisson [9].

I.4.1. Propriétés organoleptiques

➤ La Couleur

Dans l'idéal, l'eau potable doit être claire et incolore. Le changement de couleur d'une eau potable peut être le premier signe d'un problème de qualité. Dans un échantillon d'eau, l'intensité relative d'une couleur est analysée à l'aide d'une échelle arbitraire composée d'unités de couleur vraie [10].

➤ Gout et odeur

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur non désagréables. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmes subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère [10].

➤ Turbidité

La turbidité désigne la teneur d'une eau en particules suspendues qui la troublent. C'est la propriété optique la plus importante des eaux naturelles. On mesure la turbidité en unités de turbidité céphalométriques (UTN) à l'aide d'un turbidimètre. Cet instrument envoie un rayon de lumière à travers un échantillon d'eau et mesure la quantité de lumière qui passe à travers l'eau par rapport à la quantité de lumière qui est réfléchiée par les particules dans l'eau [10].

I.4.2. Caractères physico-chimiques

➤ Température

Pour l'eau potable, la température maximale acceptable est de 15°C, car on admet que l'eau doit être rafraîchissante. Quand les eaux naturelles sont au-dessus de 15°C, il y a 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].

➤ **Potentiel d'hydrogène**

C'est une mesure de l'activité des ions H^+ contenus dans une eau. En chimie, par convention, on considère le pH de l'eau pure comme celui qui correspond à la neutralité d'une solution. Autrement dit, toute solution de pH inférieur à 7 (à 25°C) est considérés comme acide et inversement [9].

➤ **Salinité**

La salinité totale d'une eau correspond à la somme des cations et des anions présents exprimée en mg/l [10].

➤ **Les résidus secs à 180°C**

Les Résidus secs obtenus par évaporation, représentent les matières dissoutes et en suspensions d'une eau [10].

➤ **Dureté ou titre hydrométrique (TH)**

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau est une grandeur reliée à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception de ceux des métaux alcalins (Na^+ , K^+), dans la plupart des cas, la dureté est surtout due aux ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} 17 (ions alcalino-terreux). Un degré hydrotimétrique ($^{\circ}TH$) correspond à une concentration en ions Ca^{2+} ou Mg^{2+} .Un degré hydrotimétrique correspond aussi à un degré français ($1^{\circ}F$).

➤ **Conductivité électrique**

La conductivité des eaux potables est souvent liée à la concentration en sels minéraux dissous. Son unité est exprimée en ($\mu s/cm$) [11].

➤ **Alcalinité**

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des bicarbonates, carbonates et les hydroxydes, elle est mesurée soit par le titre alcalimétrique (TA) ou par le titre alcalimétrique complet (TAC) [12].

➤ **Titre alcalimétrique (TA) ou titre alcalimétrique complet (TAC)**

Les valeurs relatives du TA et du TAC permettent de connaître les teneurs en hydroxydes, carbonates et hydrogénocarbonates contenu dans l'eau. Le TA permet de déterminer, en bloc, la teneur en hydroxydes et seulement la moitié de celle en carbonate. La TAC assure la détermination de la teneur en hydrogénocarbonates [13].

➤ **Chlorure**

Les teneurs en chlorures (Cl^-) des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés. Ainsi, les eaux courantes non polluées ont souvent une teneur en

chlorures. Dans l'eau, le chlorure n'a ni odeur, ni couleur, mais peut procurer un goût salé [14].

➤ **Autres principaux éléments présents dans l'eau**

En plus du chlorure présent dans l'eau, elle contient aussi d'autres éléments chimiques, cation et anion.

I.4.3. Paramètres indésirables ou toxiques

➤ **Fer et manganèse**

Ces deux éléments existent dans la plupart des eaux et sont généralement liés ; ils entraînent des conséquences similaires : formation de dépôts, goûts désagréables et prolifération bactérienne. Bien que nécessaire à la nutrition humaine, le fer et manganèse ne doivent pas dépasser certaines teneurs.

➤ **Métaux lourds**

Certains éléments sont rarement présents dans les eaux à l'état naturel mais sont apportés par les divers rejets. La dose dangereuse est difficile à fixer car la toxicité de ces éléments est surtout d'origine cumulative. Les principaux d'entre eux sont : argent, cadmium, cuivre, mercure, nickel, plomb, zinc ...etc. [15].

I.4.4. Les paramètres microbiologiques

L'eau ne doit contenir ni microbes, ni bactéries pathogènes, ni virus qui pourraient entraîner une contamination biologique et être la cause d'une épidémie. Le dénombrement bactérien consiste à rechercher des bactéries aérobies, c'est-à-dire celles qui pourraient se développer en présence d'oxygène. Cette analyse est surtout significative pour l'étude de la protection des nappes phréatiques.

À 37 °C et pendant une durée de 24 heures, on isole les bactéries vivant chez l'homme et chez les animaux à sang chaud. Si la population bactérienne ne dépasse pas 10 unités/ml, on peut en conclure qu'il n'y a pas de risques potentiels.

À 20-22 °C et pendant une durée de 72 heures, on isole les bactéries du milieu naturel. Si la population bactérienne ne dépasse pas 100 unités/ml, on peut en conclure qu'il n'y a pas de risques potentiels.

- Coliformes totaux et fécaux (Concentration maximale).
- Streptocoques fécaux (Concentration maximale).
- Clostridium sulfito-réducteurs (Concentration maximale).
- Staphylocoques pathogènes (Concentration maximale).

La présence de coliformes fécaux ou de streptocoques fécaux indique une contamination de l'eau par des matières fécales. La présence d'autres coliformes, de clostridium ou de staphylocoques laisse supposer une contamination de ce type. Dans les deux cas, des mesures doivent être prises pour interdire la consommation de l'eau ou en assurer le traitement. Les pollutions microbiologiques ne sont pas rares : d'après l'Institut Français de l'Environnement, plus de 17 millions de personnes ont consommé en 1997 une eau ponctuellement polluée par des streptocoques fécaux ou des coliformes. Dans ce domaine, on manque encore d'études épidémiologiques. [16].

I.5. Pollution des eaux

I.5.1. Définition

La pollution de l'eau est due à sa contamination par des corps étrangers tels que des microorganismes, des produits chimiques, des déchets industriels ou autres. Ces substances et corps étrangers dégradent la qualité de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités.

La pollution des eaux se traduit par des effets très spécifiques dus aux particularités écologiques propres aux milieux aquatiques. L'eau est capable de dissoudre peu ou prou, mais souvent avec facilité, la plupart des substances chimiques minérales ou organiques ; de plus, elle met en suspension les matières entraîné par le jeu du cycle hydrologique fort loin en aval de la source de contamination [17].

I.5.2. Origine de la pollution

Suivant l'origine des substances polluantes, nous distinguons :

I.5.2.1. La pollution domestique

Provenant des habitations, elle est en général véhiculée par le réseau d'assainissement jusqu'à la station d'épuration (si elle existe).

La pollution domestique se caractérise par des germes fécaux, de fortes teneurs en matières organiques, des sels minéraux (azote, phosphore) et des détergents.

En sortie des stations d'épurations, nous retrouvons les mêmes éléments en quantités moindre (50 à 90% éléments) mais concentrés au point du rejet [18].

I.5.2.2. Pollution industrielle

Les industries, en particulier chimiques, métallurgiques et même électroniques, constituent une cause essentielle de la pollution des eaux. Celle-ci prend place non seulement au niveau des usines mais aussi au niveau de l'utilisation des substances produites et au niveau des objets manufacturés, en fin de cycle du produit, avec les déchets [17].

Elle est caractérisée par une très grande diversité, selon l'utilisation de l'eau dans les

processus (refroidissement, lavage, extraction, mise en solution...etc.). Nous pouvons donc retrouver dans l'eau, qui est un bon solvant, tous les sous-produits possibles de l'activité humaine : Des matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, abattoirs et équarrissage), Hydrocarbures (raffineries), acides, bases et produits chimiques divers (industries chimiques et pharmaceutiques) [18].

I.5.2.3 Pollution agricole

Elle dépend de plusieurs types d'activités : agricoles, d'élevages et liée à l'habitat.

L'agriculture est devenue une cause importante de pollution des sols et des eaux par suite de l'usage systématique des engrais chimiques et des pesticides.

L'élevage traditionnel abouti au fumier qui constitue des litières souillées de déjections animales (fertilisant naturel). Il présente de fortes charges organiques.

Aux activités précédemment décrites s'ajoutent une pollution de type domestique liée à l'habitat du monde rural [17].

Certaines de ces pollutions ont un effet cumulatif et retardé (cas des nitrates dans les nappes phréatiques). Ce qui ne facilite pas l'étude de ces phénomènes et la lutte contre leurs effets [17].

I.5.2.4 Pollution par les eaux pluviales

Il ne faut pas oublier par ailleurs la pollution générée par les eaux pluviales. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles).

I.5.2.5 Pollution d'origine naturelle

Certaines substances naturellement présentes dans l'environnement entraînent parfois des problèmes de contamination de l'eau potable. Des composés inorganiques comme le baryum, l'arsenic, le sodium, les chlorures, le mercure, le cadmium et les cyanures peuvent contaminer l'eau potable. L'eau souterraine est particulièrement vulnérable lorsqu'il y a présence de métaux dans les formations géologiques environnantes.

I.5.3. Les différents polluants présents dans les eaux usées

On distingue:

I.5.3.1. La pollution physique

C'est une pollution due aux agents physiques (tout élément solide entraîné par l'eau), elle est d'origine domestique, essentiellement industrielle. On peut la répartir en trois classes : mécanique, thermique et radioactive [17].

I.5.3.1.a. La pollution mécanique

Elle résulte des décharges de déchets et de particules solides apportés par les ERI, ainsi que les eaux de ruissellement. Ces polluants sont soit les éléments grossiers soit du sable ou bien les matières en suspension MES [19].

I.5.3.1.b. La pollution thermique

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, raffineries, aciéries...) ; ont une température de l'ordre de (70 à 80) °C. Elle diminue jusqu' à (40 à 45) °C lorsqu'elle contacte les eaux des milieux aquatiques entraînant un réchauffement de l'eau, qui influe sur la solubilité de l'oxygène. En outre tout changement de température cause des effets significatifs sur la survie des organismes aquatiques. Un abaissement important de température ralenti la plupart des réactions chimiques vitales voire les arrêter. Au contraire, des augmentations de température peuvent tuer certaines espèces, mais également favoriser le développement d'autres organismes causant ainsi un déséquilibre écologique [17] .

I.5.3.1.c. La pollution radioactive

C'est celle occasionnée par une éventuelle radioactivité artificielle des rejets qui trouvent leur source dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ces formes (installations et centrales d'exploitation de mine d'uranium, traitement des déchets radioactifs). Les éléments radioactifs s'incorporent dans les molécules des organismes vivants. Plus on s'élève dans la chaîne alimentaire plus les organismes sont sensibles aux Rayonnements [17] .

I.5.3.2. La pollution chimique

Elle résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle. La pollution chimique des eaux est regroupée dans deux catégories :

Organiques (hydrocarbures, pesticides, détergents, phénols..) ;

Minérales (métaux lourds, cyanure, azote, phosphore...) .

I.5.3.2.a. Pollution organique

C'est les effluents chargés de matières organiques fermentescibles (biodégradables), fournis par les industries alimentaires et agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries...). Ils provoquent une consommation d'oxygène dissous de ces eaux, en entraînant la mort des poissons par asphyxie et le développement (dépôts de matières organiques au fonds des rivières) de fermentation anaérobie (putréfaction) génératrices de nuisances olfactives.

I.5.3.2.b. Pollution minéral

C'est la matière qui n'est pas organique c'est-à-dire qu'elle ne contient généralement pas de carbone. Cette matière minérale sont les sels, toutes les matières structurées autour du silicium, ((métaux lourds, cyanure, azote, phosphore... etc.)).

I.5.3.3. La pollution microbiologique

L'eau peut contenir des microorganismes pathogènes (virus, bactéries, parasites) ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau (industrie, utilisation domestique...).

I.5.4. les étapes du traitement de l'eau

Le traitement d'une eau brute après son captage dépend de sa qualité et de ses constituants, critères qui varient dans le temps. L'eau puisée dans l'environnement doit donc être analysée en continu avant de subir le traitement de potabilisation approprié.

Ce contrôle exécuté, l'eau subit plusieurs traitements avant d'être distribuée dans les circuits d'eau potable.

I.5.4.a. Dégrillage et tamisage

Le passage de l'eau captée à travers des grilles et tamis élimine les plus gros débris.

I.5.4.b. Oxydation

Si la charge organique est très importante ou s'il y a de l'ammoniaque, du fer ou du manganèse en solution, l'oxydation facilite leur élimination lors de la phase de clarification. Cette étape d'oxydation peut se faire avec du chlore ou de l'ozone.

I.5.4.c. Clarification

La clarification regroupe les procédés de coagulation-floculation, décantation ou flottation et de la filtration. Le but est d'éliminer les MES (matières en suspension) minérales et organiques d'une eau brute ainsi qu'une partie des matières organiques dissoutes, fraction floculable. Suivant les concentrations des différents éléments indésirables, plusieurs techniques peuvent être mises en oeuvre dont .

I.5.4.d. Décantation

Après avoir rassemblé les différentes petites particules en beaucoup plus grosses, il va maintenant falloir faire décanter tout ceci. Dans un corps d'eau immobile les particules en suspension plus lourdes que l'eau sont soumises à leur poids apparent .

I.5.4.e. Flottation

Elle permet de séparer les matières rassemblées en floc comme pour la décantation, mais s'applique aux matières qui ne décantent pas ou très lentement telles que les graisses, hydrocarbures.

I.5.4.f. Filtration

Le système de filtration est composé de filtres avec des tailles différentes et se compose la plupart du temps de gravier, sable et de charbon de bois. Il y a deux types de filtration de base par le sable : la filtration lente par le sable et la filtration rapide par le sable. La filtration lente par le sable est un processus biologique parce qu'elle emploie des bactéries pour traiter l'eau. Les bactéries forment une couche sur la partie supérieure du sable et nettoie l'eau pendant qu'elle traverse, en digérant les contaminants dans l'eau. La couche de bactéries s'appelle le biofilm. La filtration rapide par le sable est un processus physique qui enlève les solides en suspension dans l'eau. Cette filtration rapide est beaucoup plus répandue parce que les filtres de sable rapide ont des débits assez élevés et exigent peu d'espace pour fonctionner. Durant la filtration, le taux d'écoulement de l'eau peut aller jusqu'à 20 mètres par heure. Les filtres sont généralement nettoyés 2 fois par jour.

Les particules qui sont enlevées dans l'eau durant la filtration dépendent de la taille des filtres qui sont utilisés. La filtration lente enlève les bactéries, les virus et les protozoaires et produit essentiellement de l'eau propre. Il est recommandé d'employer un désinfectant comme mesure conservatoire. La filtration rapide enlève les particules suspendues, comme les bactéries, les virus et les protozoaires. Dans les installations de traitement, la filtration enlève un grand nombre de contaminants, mais exige toujours la désinfection pour produire de l'eau potable sûre. Même si la filtration rapide ne puisse pas enlever toutes les bactéries et les virus, c'est une étape importante dans le processus de traitement. La coagulation et la filtration peuvent enlever les matières en suspensions et dissoutes, de sorte que la désinfection soit plus réussie avec une quantité réduite de chlore. Le principe du filtre sous gravier est d'imiter le cycle d'épuration de la nature en utilisant le fond sableux de l'aquarium. L'eau chargée d'impuretés organiques (essentiellement des déchets solides, des substances ammoniaquées et des nitrites) est entraînée par un courant lent descendant à travers l'épaisseur de gravier. L'eau abandonne au passage ses impuretés solides dans le gravier. Le charbon est une substance qui depuis longtemps est utilisé pour adsorber les impuretés. Le charbon actif est un carbone qui a une légère charge électrique positive le rendant attirant aux produits chimiques et aux impuretés. Pendant que l'eau traverse le charbon actif, les ions négatifs des contaminants sont attirés sur la surface des granules de carbone. Les filtres de charbon actif enlèvent/réduisent beaucoup de produits chimiques organiques volatils, pesticides et herbicides, comme le

chlors, le benzène, le radon, les dissolvants et d'autres produits chimiques synthétiques trouvés dans l'eau de robinet .

II. Coagulation-Floculation

II.1.Introduction

En tant que processus unitaire du traitement de l'eau, la coagulation résulte de l'addition de réactifs chimiques dans des dispersions aqueuses, afin d'assembler en agrégats plus gros, les fines particules dispersées. Ces nouveaux agrégats peuvent être éliminés, après floculation, par des procédés tels la décantation ou la filtration. La floculation est considérée ici comme processus distinct qui a lieu en fin de coagulation. Elle consiste à favoriser la croissance de floes macroscopiques, avec ou sans utilisation d'additifs tels les adjuvants de floculation.

L'efficacité de cette étape de traitement est liée au pH, au type et au dosage du coagulant ainsi qu'à la nature des particules et des matrices minérales et organiques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur le procédé de coagulation floculation avec les différents coagulants et les réactions d'hydrolyse du coagulant.

II.2.Le procédé de coagulation-floculation

II.2.1. La coagulation

La coagulation est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques amenant un processus comportant, en premier lieu la déstabilisation d'une suspension colloïdale, et en second lieu l'agrégation des particules en petits amas, ou flocons, sous agitation et sous l'action du mouvement brownien.

II.2.2. La floculation

La floculation est l'ensemble des phénomènes physico-chimique menant à Processus de grossissement et d'uniformisation des flocons sous l'influence d'un brassage modéré.

Elle a pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules colloïdales déstabilisés et leur agglomération pour accroître son volume, sa masse, et sa cohésion.

Ce 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. [20]

II.2.3. La coagulation-floculation

La coagulation-floculation facilite l'élimination des MES (Matières En Suspension) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floes dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration. C'est donc un traitement physique qui permet d'éliminer tout ou partie des polluants des effluents notamment les fractions particulaires inertes ou vivantes, les fractions floculables des matières organiques et de certains métaux lourds, les micropolluants associés aux MES et les macromolécules colloïdales (figure II.1). Donc, L'opération de

coagulation-floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par déstabilisation des particules en suspension puis formation de flocs par absorption et agrégation. Les flocs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite.

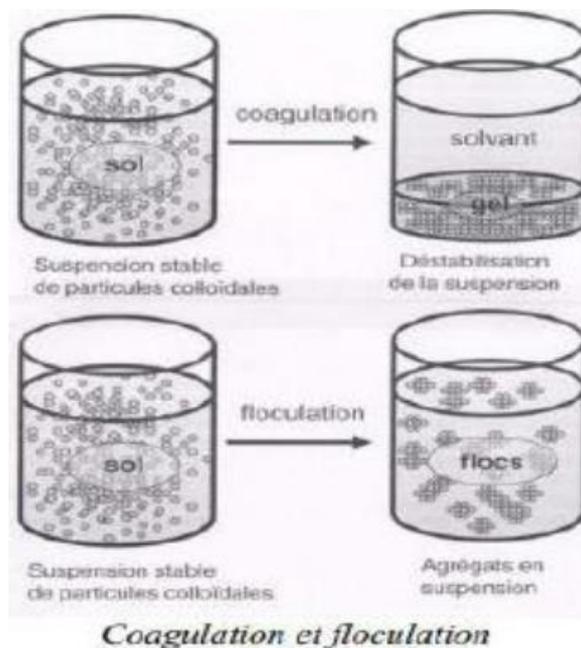


Figure I.1. Phénomène de coagulation-floculation.

II.3. Les matières en suspension et colloïde

Les matières existantes dans l'eau peuvent se regrouper en trois catégories suivantes:

➤ **Matières en suspension**

qui regroupent les plus grosses particules, ces matières sont d'origine minérales ou organique et possèdent un diamètre supérieur à $1\mu\text{m}$. leur temps requis pour décanter d'un mètre varie de quelques dixièmes de secondes à plusieurs jours selon leur diamètre et leur densité.

➤ **Matières colloïdales**

sont des MES de même origine mais de diamètre inférieur à 1 micron. Leur vitesse de décantation est pratiquement nulle. Les matières colloïdales, d'origine minérale ont une densité relative de l'ordre de 2.65 alors que celles d'origine organique ont une densité relative beaucoup plus faible. Soit de l'ordre de 1.1. Les particules colloïdales de faible densité peuvent nécessiter théoriquement jusqu'à 66600 années pour décanter de un mètre.

➤ **Matières dissoute**

sont généralement des cations ou anions de quelques nanomètres de diamètres.

II.3.1. Les suspensions colloïdales

Pour leur étude, les particules colloïdes sont classées en deux groupes suivant leur comportement vis-à-vis de l'eau. Il s'agit des particules hydrophobes et hydrophiles.

➤ Les colloïdes hydrophiles

Les hydrophiles sont des micromolécules complexes à nombre élevé d'atomes, et qui englobent la plupart des corps de la chimie organique.

Les particules hydrophiles déshydratées se dispersent spontanément dans l'eau et sont entourées de molécules d'eau qui préviennent tout contact ultérieur entre ces particules (figure I.2).

Parmi les substances de cette nature, on peut citer les protéines, les savons, la gélatine et la matière organique naturelle.

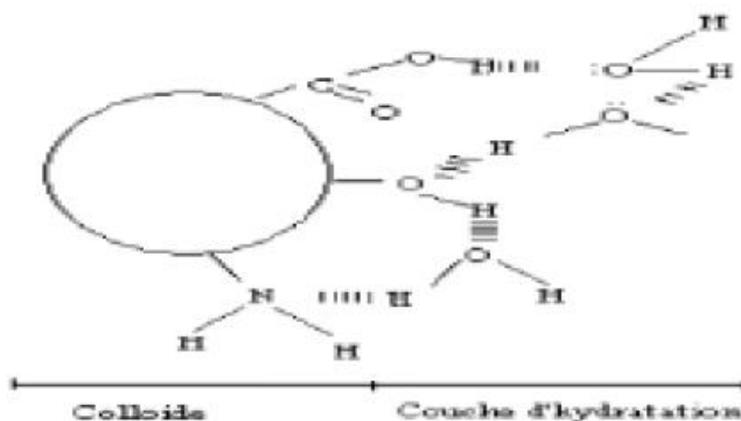


Figure I.2. Représentation de colloïde hydrophile

➤ Les colloïdes hydrophobes :

Les colloïdes hydrophobes sont en générale de nature minérale. Ils n'ont aucune affinité pour les molécules d'eau. La formation d'une couche d'hydratation est impossible. Leur surface présente des charges négatives qui engendrent une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération. Ce type de particules est en partie responsable de la turbidité. Peu de colloïdes sont exclusivement hydrophiles ou hydrophobes. Il s'agit en fait d'un degré d'hydratation plus ou moins important autorisé par la présence de groupement fonctionnels de type hydrophile.

L'existence des systèmes colloïdaux dépend de l'interaction entre deux particules. Elle met en jeux deux forces contraires :

- Une force de répulsion électrostatique qui tend à écarter les particules les unes des autres. Cette force dépend de la charge des particules qui sont de même signe.
- Une force d'attraction (type de Van der Waals) liée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu.

II.3.2. Décantation des suspensions colloïdales

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique. Ce temps va d'une seconde pour du

gravier coagulé ayant un diamètre de 10 mm et une surface spécifique de $6.10^2 \text{ m}^2.m^{-3}$ à 20 ans pour du colloïde de $10^{-2} \mu\text{m}$ ayant une surface spécifique de $6.10^8 \text{ m}^2.m^{-3}$

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 μm . Malheureusement, ces particules exercent entre elles des forces de répulsion de nature électrostatique empêchant leur assemblage (tableau I.1).

La déstabilisation des entités en suspension passe par des phénomènes d'adsorption expliqués par la théorie de la double couche. Elle explique comment les colloïdes sont traités par coagulation.

Tableau (I.1):Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de Stokes

Diamètre de Particule		Type de particule	Temps de décantation pour 1 m d'eau	Surface spécifique $\text{m}^2.m^{-3}$	
Mm	μm				
10	10^4	Gravier	1 seconde	6.10^2	MES décantations
1	10^3	Sable	10 secondes	6.10^3	
10^{-1}	10^2	Sable fin	2 minutes	6.10^4	
10^{-2}	10	Limon	2 heures	6.10^5	
10^{-2}	10	Kyste de protozoaire	20 heures	6.10^5	Colloïdes
10^{-3}	1	Argile	2 jours	6.10^6	
10^{-3}	1	Bactérie	8 jours	6.10^6	
10^{-4}	10^{-1}	Colloïde	2 ans	6.10^7	
10^{-5}	10^{-2}	Colloïde	20 ans	6.10^8	

II.4. Théorie de la double couche

Les colloïdes sont généralement chargés négativement. Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés sont attirés et forment une couche autour du colloïde. Diverses théories expliquent ce phénomène (Théorie de Helmholtz ; Théorie de Gouy-Chapman ; Théorie de Stern)

- **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 une plus grande distance (couche diffuse)

- **Théorie de Sten** : qui combine les deux théories précédentes et considère la formation d'une double couche : la première formée d'ions du liquide mais adhérente au colloïde, la seconde diffuse dans le liquide environnant. Le potentiel subit une première chute significative dans la couche fixée, puis diminue plus lentement à mesure que la distance augmente jusqu'à son annulation au point A (**point isoélectrique**).

II.5. Phénomène de coagulation :

La charge électrique et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les une des autres et, par conséquent, à les stabiliser dans la solution. Le but principal de coagulation est de déstabiliser ces particules pour favoriser leur agglomération. On peut obtenir cette déstabilisation par:

- a) compression de la double couche;
- b) adsorption et neutralisation des charges;
- c) emprisonnement des particules dans un précipité;
- d) adsorption et pontage ;

II.5.1. Compression de la double couche

Lorsqu'un électrolyte est ajouté à une dispersion colloïdale, la charge de la surface ne change pas si la charge est causée par une imperfection du cristal comme dans le cas des particules d'argile. Toutefois, l'addition de l'électrolyte va augmenter la densité de charge dans la couche diffuse en favorisant sa contraction. L'effet de cette contraction consiste à changer la distribution des forces répulsives de la double couche au sein du colloïde, entraînant une réduction de la surface potentielle avec l'augmentation de la concentration de l'électrolyte, ce qui permet aux forces attractives de van der Waal's de devenir plus dominantes, favorisant ainsi l'agrégation des particules (figure II.3) A une concentration d'électrolyte élevée la force de répulsion disparaît et l'agglomération des particules se fait rapidement. Mais, aucune renubilisation des particules due à une inversion de charges ne devrait apparaître après ajout d'un surplus de coagulant [21].

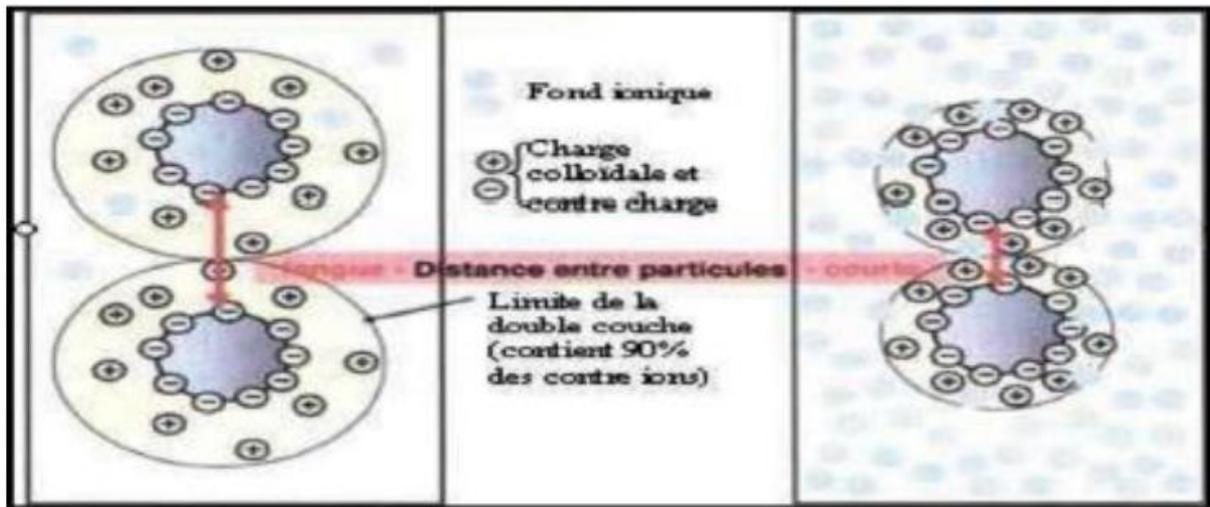


Figure I.3 Représentation schématique de la compression de la couche diffuse

II.5.2. Adsorption et neutralisation des charges

Ce mécanisme repose sur l'ajout suffisant de cations afin de neutraliser la charge négative des particules stables par adsorption des cations sur leur surface. Par contre, la surdose de coagulant, source de cations, peut résulter en une adsorption trop importante de cations et inverser la charge des particules qui devient alors positive. Les particules seraient ainsi rentabilisées (figure I.4).



Figure I.4 : Représentation schématique de neutralisation des charges [22]

II.5.3. Adsorption et pontage

Dans quelques cas, on a obtenu le traitement le plus économique en utilisant un polymère anionique lorsque les particules étaient chargées négativement. Ce phénomène, n'explicable à l'aide de la théorie électrique, peut toutefois être expliqué par le "pontage". Les molécules de polymère, très longue contiennent des groupes chimique qui peuvent adsorber des particules

colloïdale à une de ses extrémité, alors que d'autres sites sont libre pour adsorber d'autre particules .On dit alors que les molécules polymères forment des "ponts" entre les particules colloïdal (figure I.5). Il peut y avoir restabilisation de la suspension, imputable à une concentration excessive de polymères de polymères s'accrochent à une même particule colloïdale .Cet ensemble particule –molécule de polymères ne peut plus par la suite absorber d'autres particules colloïdal, ce qui est encore contraire au but recherché. [23]

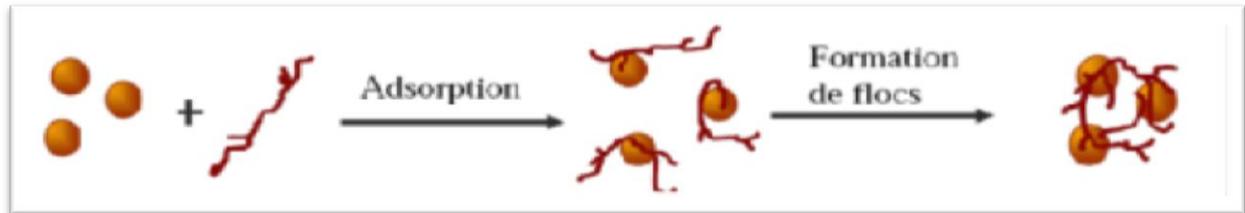


Figure I.5: Adsorption et pontage à l'aide d'un polymère [23].

II.6. Phénomène de floculation

La floculation est l'agrégation des particules déjà déstabilisées, par collision les unes contre les autres qui se conduisent à la croissance en taille du floc et à la diminution en nombre des particules en solution. Les processus préalables à la floculation sont :

- La coagulation.
- Les oxydations chimiques ou biologiques qui détruisent les colloïdes protégés.
- Le changement des conditions générales tel que le pH et la température.
- Et enfin, l'utilisation de réactifs auxiliaires (par exemple : les adjuvants de floculations).

II.7. Les étapes de l'agrégation

Diverses phases successives ou simultanées interviennent dans l'agrégation des particules qui sont l'hydrolyse (formation des radicaux hydroxydes métalliques), la coagulation et la floculation (tableau II.2). [24]

Tableau I.2 : Les étapes de l'agrégation [24]

Stade	Phénomènes	Terminologie
Ajout du coagulant	Réaction avec l'eau, ionisation, hydrolyse, polymérisation	HYDROLYSE
Destabilisation	Compression de la double couche	COAGULATION
	Absorption spécifique d'ions du coagulant à la surface de la particule	
	Inclusion du colloïde dans un précipité d'hydroxyde	
	Liaison interparticulaire par des espèces polymériques du coagulant	
Transport	Mouvement Brownien	FLOCCULATION PERICINETIQUE
	Energie dissipée (gradient de vitesse)	FLOCCULATION ORTHOCINETIQUE

II.8. Les coagulants

Les sels métalliques sont indéniablement les coagulants les plus utilisés dans le monde actuellement. Le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique, le sulfate ferrique et le polychlorure d'aluminium sont les principaux produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau potable. Ces produits agissent en neutralisant la charge négative des composés dissous et des particules en suspension dans l'eau au moyen de la charge positive de l'aluminium ou du fer. Cette action entraîne la formation de particules plus grosses qui se déposent rapidement au fond de l'eau [25].

II.8.1. Sels de fer

Les sels de fer sont généralement plus coûteux que le sulfate d'aluminium, ce qui explique leur emploi plus restreint. Par ailleurs les composés du fer semblent avoir de légers avantages comparativement aux autres et ces, grâce au fait que le floc formé soit lourd et se dépose facilement sous des conditions favorables (Tableaux II.3). [26]

Tableau I.3 : Dérivés de sel de fer. [24]

Sels de fer	Formule chimique
Chlorure ferrique	FeCl ₃
Sulfate ferrique	Fe ₂ (SO ₄) ₃

➤ **Le sulfate ferrique**

Suivant la turbidité de l'eau, la dose de sulfate ferrique sera comprise entre 10 et 50 g/m³ [26].

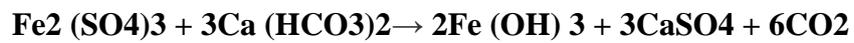


Figure I.6: Le sulfate ferrique en poudre.

➤ **Chlorure ferrique:**

La dose de chlorure ferrique sera comprise entre 5 et 150 g/m³ pour la clarification des eaux de surface, et entre 50 et 300 g/m³ pour la clarification des eaux résiduaires [27].



Figure I.7 : Le chlorure ferrique en poudre.

II.8.2. Sulfate d'aluminium

L'efficacité de la clarification dépend d'abord du coagulant utilisé. Les coagulants les plus généralement efficaces et utilisés sont des sels de métaux, à bases d'aluminium ou de fer.

Pour l'utilisation des sels de métaux à base de fer à dose élevée induit souvent une coloration rouille de l'eau traitée: c'est le principal inconvénient de ces produits : [28]

- La gamme de pH d'utilisation est de 5,7 à 7,2 (Optimum 6).
- Sa formule générale est : $Al_2(SO_4)_3 \cdot n H_2O$.
- Produit commercial $n = 14$, produit pur $n = 18$.
- Il est disponible sous différentes formes solides (selon les fabricants),
- Concassé, morceaux de 10 cm de large et de 1 cm d'épaisseur environ,
- Noisette, granulométrie comprise entre 2 et 12 mm ou 3 et 35 mm,
- Poudre, granulométrie courante de 0,1 à 3 mm,
- Sous forme de solution aqueuse à 8,2% d' Al_2O_3 (oxyde d'aluminium ou Alumine).
- solution à 600 ou 720 g · L⁻¹ environ de sulfate d'alumine cristallisé.



Figure I.8 sulfate d'aluminium en poudre.

II.9. Choix du coagulant

Un certain nombre de paramètres doivent être pris en compte :

- Température de l'eau,
- Caractéristiques des eaux brutes (dont l'équilibre calco-carbonique)
- Paramètres physico-chimiques à inclure ou éliminer prioritairement (turbidité et/ou
- Matières Organiques, par exemple),

- Gestion de l'exploitation (stocks, automatisme, etc.);
- Coût du produit ;
- Choix imposé ou considération esthétique ; [29]

II.10. Facteurs influençant la coagulation

Le processus de coagulation est complexe et peut être influencé par plusieurs facteurs. Et pour optimiser le procédé de coagulation-floculation, il faut tenir compte de plusieurs variables en relation, comme le pH, les sels dissous, le coagulant utilisé, les conditions de mélange et la température de l'eau, la turbidité, la couleur, grosseurs et concentration des particules colloïdales, et l'hydratation. Les facteurs qui peuvent influencer la coagulation sont :

II.10.1. pH

C'est la variable la plus importante à prendre en considération au moment de la coagulation. [30].

Il est d'ailleurs important de remarquer que l'ajout d'un coagulant modifie souvent le pH de l'eau. Cette variation est à prendre en compte afin de ne pas sortir de la plage optimale de précipitation du coagulant. [31]

La plage du pH optimal est la plage à l'intérieur de laquelle la coagulation a lieu suffisamment rapidement. Pour les sels de fer et d'aluminium, les plages de pH optimales s'étendent respectivement de 4 à 6 et de 5 à 7.

II.10.2. Turbidité

La turbidité est, elle aussi, un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de coagulation. Dans une certaine plage de turbidité, l'augmentation de la concentration en particules doit être suivie d'une augmentation de la dose de coagulant. [32]

II.10.3. Température de l'eau

La température joue un rôle important. En effet, une température basse, entraînant une augmentation de la viscosité de l'eau, crée une série de difficultés dans le déroulement du processus: la coagulation et la décantation du floc sont ralenties et la plage du pH optimal diminue. Pour éviter ces difficultés, une solution consiste à changer de coagulant en fonction des saisons. [33]

II.10.4. Type de coagulant

Le choix du coagulant peut influencer les caractéristiques de la coagulation. Ainsi, même si le sulfate d'aluminium est le coagulant le plus fréquemment utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par du sulfate ferrique. Ce dernier procure en effet à plusieurs eaux une plage de pH optimale plus large que celle due au premier. De plus, pour un même pH élevé, le sulfate ferrique est moins soluble que sulfate d'aluminium.

On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale, pour une eau donnée, qu'après avoir effectué des essais en laboratoire. La théorie qui explique les différents mécanismes de déstabilisation des particules colloïdales n'est pas suffisamment développée pour qu'on puisse résoudre un problème aussi complexe. Cette théorie est cependant très utile aux moments de la planification des essais de laboratoire et de l'interprétation des résultats obtenus. [34]

II.10.5. Temps de mélange

A la première étape la coagulation nécessite un mélange vigoureux et de courte durée (180 s au maximum) afin de disperser de façon uniforme le coagulant. A la deuxième étape, le mélange est lent et il a pour but de favoriser les contacts entre les particules de floc d'une durée de 15 à 30 min. [35]

II.10.6. Sels dissous

Dans la coagulation et la floculation, les sels dissous dans une eau modifient la plage de pH optimale, le temps requis pour la floculation, la quantité de coagulant requis et la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent. [27]

II.10.7. La concentration du coagulant

La détermination de la concentration du coagulant est un paramètre essentiel pour la déstabilisation des colloïdes. Une dose de coagulant excessive entraîne une ré-stabilisation des particules colloïdales qui sont susceptibles de la charge de surface et augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité de l'eau traitée insuffisante.

II.10.8. Coagulation de la couleur

de la couleur avaient un diamètre supérieur à 3.5 nm ; ces particules sont donc des particules colloïdales beaucoup plus petites que les particules de glaise responsable de la turbidité (rappelons que le diamètre des particules de glaise est de l'ordre 1µm). La plus part des particules responsable de la couleur possèdent des charge négatives à leur surface .

En général, la couleur d'une eau est due à la décomposition de matières organiques contenues dans l'humus des sols. Elle dépend donc d'une grande variété de composés organique, dont les substances humiques, lesquelles sont des polymères dont la masse moléculaire varie de 800 à 50000. Des études ont révèlent que 90% des particules responsables surface, dont l'intensité dépend du degré d'ionisation et du pH de l'eau. On peut dire que les particules responsables de la couleur sont de natures organiques, hydrophiles, petites et chargées négativement. [28]

III. Choix du flocculant (graines de cresson)

III.1. Définition

La graine de cresson est généralement appelé cresson. C'est une herbe comestible à croissance rapide qui est étroitement liée à la moutarde et au cresson de fontaine. En raison de sa saveur piquante, la graine de cresson est très populaire comme garniture pour les pâtes ou les sandwichs.

Cependant, le cresson cru pourrait être consommé sous forme de pousses pour être ajouté à la salade et à la soupe parce qu'ils sont fondamentalement comme des mini-légumes à feuilles.

La chose la plus étonnante au sujet de la graine de cresson est non seulement sa taille minuscule, mais toutes les parties sont comestibles telles que les feuilles, les tiges et les graines. Bien que les feuilles et les tiges puissent être consommées crues, les graines de cresson de jardin doivent d'abord être grillées.

Eh bien, non seulement les feuilles et les tiges, mais aussi les bienfaits pour la santé des graines de cresson sont tout à fait étonnants. Vous devez être surpris des avantages que vous pourriez tirer de la consommation de ces minuscules légumes à feuilles qui portent le nom botanique de *Lepidium sativum*. [36]

III.2 Les vertus du cresson

Votre allié minceur. Riche en nutriments comme le potassium, le cresson vous aide à garder la ligne, car il est très faible en calories. Par ailleurs, il a un pouvoir détoxifiant.

Pour un moral au top ! Avec le cresson, plus question de se sentir déprimé ou démotivé. Grâce à sa forte teneur en vitamines B et B6, le cresson permet au cerveau de créer de la dopamine et de la sérotonine. Deux neurotransmetteurs à l'origine des sensations de plaisir et de bien-être.

Il renforce votre immunité. Manger du cresson, surtout l'hiver, permet à votre système immunitaire de mieux lutter contre les virus, bactéries et infections. En plus, c'est délicieux. Autant ne pas s'en priver.

Pour des os en béton. Grâce à sa très forte teneur en calcium, le cresson contribue efficacement au renforcement de vos os et de l'émail de vos dents. Et dans votre bouche, il a également deux superpouvoirs : celui de faire disparaître la mauvaise haleine, et celui de stopper les saignements gingivaux.

Côté beauté : Gardez l'eau de cuisson du cresson, et utilisez-la comme après-shampooing. Votre chevelure sera ainsi plus résistante, et vous perdrez moins de cheveux.

Côté jardin : Il est tout à fait possible de cultiver du cresson chez soi, en optant pour une culture en eau. Les semis de cressons pourront être effectués d'avril à juin.

Tableau III.3. Composition du cresson comme aliment [36]

Valeurs nutritionnelles pour 100 g	
Énergie (kCal)	32 kCal
Protéines	2,6 g
Lipides	0,7 g
Glucides	5,5 g
Fibres	1,1 g
Eau	89,4 g

IV .Le plan d'expériences

IV .1. Définition

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [37]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$y = f(x_i)$$

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 [38]. 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 (Voir Chapitre II).

IV .2. Objectif du plan d'expériences

- Déterminer des valeurs optimales de réglage de différents paramètres, pour obtenir une valeur souhaitée sur un produit ou un service à mettre au point .

- Réduire le nombre d'essais à ce qui est strictement nécessaire, avec comme effet direct de minimiser les dépenses.
- Identifier les facteurs les plus influents, les interactions éventuelles entre les facteurs, et le nombre de points de mesures minimum pour obtenir le maximum d'informations.

Chapitre II

Méthode et

Matériels

II.I. Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation et la préparation du flocculant naturel choisi (gel de cresson) pour les essais de coagulation-floculation au Jar-Test dans le but de confirmer son efficacité d'éliminer la turbidité de l'eau naturelle et de l'eau usée. Les paramètres physique-chimique tel que le pH, conductivité ainsi que la turbidité sont mesurés

Afin d'évaluer le rendement d'épuration et optimiser les résultats en utilisant la méthode du plan d'expérience (plan de surface).

II.2. Dispositifs expérimentaux pour la coagulation-floculation

II.2.1. Jar-Test

Le jar-test est un appareil qui permet de déterminer la concentration optimale du coagulant pour le processus de coagulation floculation . Toutes les doses sont exprimées en poids de produits commerciaux (solution ou poudre). Les essais au laboratoire à l'aide d'un jar-test restent jusqu'à ce jour la méthode la plus couramment utilisée pour le choix des réactifs et de leurs concentrations.

II.2.1.1. L'échantillonnage

Les essais au jar test ont été réalisés sur deux types d'eaux :

- Celles d'Oued Solite (eaux naturelles)
- et les eaux cimentaire comme eaux usées

Les eaux de l'Oued ont été prélevées dans un grand récipient propre, et rincé deux fois avec ces eaux après 5 minutes d'écoulement sur un plan incliné. L'échantillon a été par la suite étiqueté et mis dans un réfrigérateur.

Les eaux usées ont été fournis par l'office national d'assainissement.

III.2.1.2. Déroulement de l'expérience

Le gel de graines de cresson a été préparé selon le protocole suivant : 40g des graines ont été mises dans 200 ml d'eau distillée. Après vingt quatre heures, le gel a été récupéré et séché dans l'étuve à 80C°.



Figure II.1. Les étapes de préparation du gel.

- Dans les essais au jar test : différentes concentrations en coagulants (FeCl_3 , $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$) et en flocculant ont été ajoutées à des échantillons d'eau dans les béchers du jar test. Ces eaux ont été ajoutées à des échantillons d'eau dans les béchers du jar test. Ces eaux ont été agitées pendant 3 minutes à une vitesse de 100 tr/min, ensuite la vitesse a été réduite à 20 tr/min pendant 15 min.
- Après 30 min de décantation et à l'aide d'une pipette, l'eau claire a été prélevée pour effectuer les analyses des paramètres suivants : la turbidité, la conductivité et le PH.



Figure II.2. Jar test (floculateur).

II.2.2. Méthodes d'analyse

Les analyses physico-chimiques sont toutes effectuées au laboratoire en utilisant des appareils appropriés. Les échantillons d'eau sont prélevés dans des flacons de 100 ml afin de mesurer trois (3) paramètres à savoir la turbidité (NUT), la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et le pH.

II.2.2.1. Mesure de la turbidité

La turbidité est un indice de la présence de particules en suspension dans l'eau. Elle est déterminée à l'aide d'une néphélométrie. Cet appareil mesure la lumière dispersée par les particules en suspension avec un angle de 90° par rapport au faisceau de lumière incident.

La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre de Turb 550 (figure II.3).



Figure II.3. Turbidimètre.

II.2.2.2. Mesure de la conductivité

La conductivité électrique est un phénomène physique qui consiste à laisser passer librement les charges électriques dans un corps, solide ou liquide. Il s'oppose à la résistivité, qui ralentit le courant en lui résistant. Les capacités de conductivité électrique sont propres à chaque matériau. Certains laissent mieux passer le courant électrique que d'autres, ils sont alors considérés comme de très bons, voire d'excellents conducteurs.

La conductivité électrique est définie en siemens par mètre ($S.m^{-1}$). Il s'agit du rapport de la densité de courant par l'amplitude du champ électrique. On mesure la conductivité électrique avec un conductimètre.

Un conductimètre est un appareil électronique permettant de mesurer la conductivité d'une solution, c'est-à-dire sa capacité à conduire le courant. Cette conductivité, notée σ et exprimée en siemens par mètre ($S.m^{-1}$), donne des informations importantes sur la minéralisation de l'eau.



Figure II.4. Conductimètre.

II.3.2.3. Mesure du pH

Le pH (potentiel Hydrogène, pouvoir Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14,7 étant le PH de neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température, il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau.

Le pH est l'un des paramètres physico-chimiques du milieu réactionnel ayant le plus d'impact sur le procédé photo catalytique. Il affecte à la fois la charge de la surface des particules du photocatalyseur, la taille des agrégats, l'énergie des bandes de conduction et de valence les équilibres des réactions radicalaires et éventuellement la nature des espèces à dégrader.

La mesure du pH est effectuée à l'aide d'un appareil de type WTW PH 730.



Figure II.5. pH-mètre.

II.3. Méthode basée sur les plans d'expériences

II.3.1. Introduction

La Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE) est une méthode qui a été initiée dans les années 20 par Sir R. A. Fisher (statisticien anglais - 1925). Les premiers utilisateurs de cette méthode furent les agronomes qui ont vite compris l'intérêt des plans d'expériences. Vers les années soixante, grâce aux travaux de Taguchi, les plans d'expériences sont utilisés au Japon dans l'industrie pour améliorer la variabilité des procédés. Après le Japon les plans d'expériences sont utilisés aux Etats Unis dans les années 80 et en Europe dans les années 90.

II.3.2 Les objectifs des plans d'expériences

- diminuer le nombre d'essais (réels ou simulations numériques)
- étudier un nombre très grand de facteurs (plans fractionnaires)
- détecter les facteurs influents (plans de criblage)
- détecter les interactions entre les facteurs (confusion ou alias)
- rechercher l'optimum (nominal ou extremum)
- réduire la variabilité ou d'étudier la robustesse d'un processus (plans produits)
- obtenir la meilleure précision sur le résultat (réponse)
- modéliser et optimiser les résultats ou les réponses (plans pour surface de réponse)

II.3.3.Principe

La méthode des plans d'expériences consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision des résultats.

Il existe des plans classiques qui possèdent d'excellentes qualités statistiques et qui permettent de modéliser les réponses dans de meilleures conditions (ex : plans factoriels complet, plans factoriels fractionnaires). À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se

localisent sur une surface appelée surface de réponses. Un exemple d'un domaine d'étude constitué d'une réponse avec deux facteurs d'étude est donné dans la Figure II.7

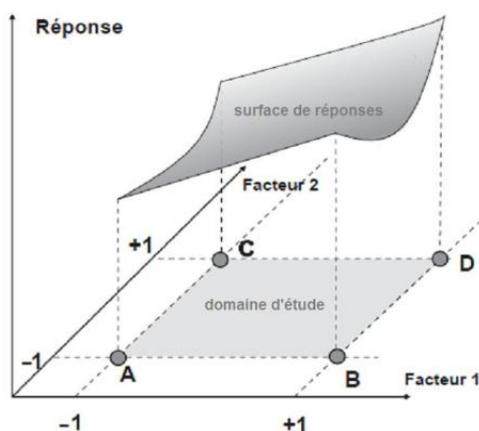


Figure.II.6. Exemple d'une surface de réponses issues d'un domaine d'étude de deux facteurs [39].

Lorsqu'on réalise une étude expérimentale (ou des simulations numériques), d'un phénomène ou d'un procédé, on la caractérise par des réponses dont on suit les variations de en fonction divers paramètres (facteurs) influents. Généralement, l'illustration des résultats est donnée par la représentation graphique de la réponse (surface de réponse) en fonction de deux paramètres (on est limité à l'espace en trois dimensions).

Si on considère une réponse théorique Y_{th} , dépendant de n paramètres (facteurs)

x_1, x_2, \dots, x_n on peut écrire :

$$Y_{th} = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{II.1})$$

Mais la réponse théorique est différente de la réponse obtenue par voie expérimentale ou numérique Y_{exp} à cause des erreurs expérimentales (ou numériques) inhérentes.

L'expression précédente devient :

$$Y_{exp} = Y_{th} + \varepsilon = F(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (\text{II.2})$$

D'une manière générale pour la modélisation d'un système n'ayant que deux variables, on peut écrire le modèle comme suit :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 \quad (\text{II.3})$$

Cette partie du travail a pour objectif l'optimisation du traitement physico-chimique par la combinaison des niveaux et des facteurs susceptible d'agir sur le traitement. Les réponses étudiées sont évidemment la demande la conductivité et la turbidité. La méthode de conception expérimentale basée sur un modèle composite de 2^{ème} ordre est employée. L'optimisation a

été réalisé en mettant en œuvre un plan d'expériences de type surface de réponse (MSR) autour d'une formule de références avec un facteur de process.

II.3.4. 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^{ème} degré permettant de donner une bonne modélisation du phénomène étudié. Les paramètres que nous eu l'intérêt de les optimiser dans la station d'épuration sont la demande chimique en flocculant 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 flocculant.

Le modèle postulé est donc donné explicitement par :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + e$$

Avec : a_0 : Effet moyen

a_1 : Effet de coagulant

a_2 : Effet de flocculant

a_{12} : Interaction entre le coagulant et le flocculant

a_{11} : Effet quadratique du coagulant

a_{22} : Effet quadratique du flocculant

II.3.4.1 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.

II.3.4.2 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 mesurées (corrigees 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.

II.3.4.3. Résidus

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

II.3.4.4. 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 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 0.01.

Chapitre III

Résultats et

Discussions

III.1. Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus lors de l'utilisation d'un flocculant naturel dans le processus de coagulation floculation des eaux et confirmer la diminution du taux de la turbidité dans cette processus.

III.2. Traitement par coagulation-floculation

Les jars tests ont été réalisées sur deux types d'eau, une eau naturelle et une eau usée, avec deux coagulants différents, le chlorure de fer (FeCl_3) et le nitrate d'aluminium ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$), plus le flocculant naturel (graines de cresson).

III.2.1. Les eaux naturelles : Eau d'Oued Selite

L'échantillon de cette eau est prélevé le 23 Mai 2021 dont les différents paramètres mesurés sont les suivants :

Turbidité = 85 NTU

PH = 8,11

T° = 25,1C°

Conductivité = 2,83ms/cm

Les résultats des jars test obtenus pour l'eau naturelle sont regroupés dans le tableau III.1, III.2, et III.3.

Tableau III.1. Valeurs du PH , conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson et le FeCl_3 .

N	concentration de gel en ppm	concentration de FeCl_3	PH	Conductivité en ms/cm	Turbidité (NTU)
1	100	100	6,88	3,25	11,6
2	50	50	7,45	3,21	16,9
3	100	50	7,46	3,28	23
4	0	0	8,25	2,96	85
5	0	100	6,74	3,38	5

6	0	50	7,26	3,21	14,6
7	50	100	6,88	3,24	13,2
8	50	0	8,02	2,89	79
9	100	0	8,08	2,95	80

D'après les résultats, obtenus on remarque une faible valeur de turbidité pour un dose de 100mg/l de chlorures de fer, et un valeur de 11,6 NTU pour une dose de 100 ppm de gel et une dose de 100ppm de nitrate d'aluminium.

les autres paramètre restent quelque peu variables.

Malgré les faibles valeurs de turbidité mesurée lors de l'utilisation des chlorures de fer par rapport au gel de cresson, ils présentent un inconvénient principal qui est la couleur résiduelle marquée causée par la présence du fer dans l'eau qui lui confère un aspect jaunâtre.

Tableau III.2.Valeurs du PH, conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson et le Nitrate d'Aluminium (Al(NO₃)₃).

N	concentration de gel en ppm	concentration de Al(NO ₃) ₃	PH	Conductivité en ms/cm	Turbidité (NTU)
1	100	100	7,11	3,17	18
2	50	50	7,66	2,95	11,7
3	100	50	7,47	3,08	19,3
4	0	0	8,07	2,87	85
5	0	100	7,39	3,04	18,6
6	0	50	7,77	2,91	8,7
7	50	100	7,29	2,54	21
8	50	0	7,62	2,97	22
9	100	0	8,04	2,94	26

Pour l'utilisation de nitrates d'aluminium comme coagulant et le gel des graines de cresson comme flocculant naturelle, on remarque la meilleur valeur de turbidité de 8,7 NTU pour une dose de 50 ppm en nitrate d'aluminium seul, et valeur de 11,7 NTU pour une dose de 50 ppm de gel et une dose de 50 ppm de nitrate d'aluminium .

Les autres paramètres restent quelque peu variables.

Tableau III.3. Valeurs du PH , conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson .

N	Concentration du gel (ppm)	PH	Conductivité (ms/cm)	Turbidité (NTU)
1	3	8,57	2,69	42
2	20	8,6	2,65	65
3	35	8,68	2,44	71
4	60	8,62	2,66	67
5	75	8,59	2,69	56
6	85	8,65	2,64	83

III.2.2. Les eaux Usées : Eau Cimentaire

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

Turbidité= 85 NUT

PH=11,76

T°=22,6 C°

Conductivité=3,21ms /cm

Les résultats des jars test obtenus pour l'eau naturelle sont regroupés dans le tableau III.4, III.5.

Tableau III.4. Valeurs du PH, conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson et le FeCl₃.

N	Concentration de gel (ppm)	Concentration de FeCl ₃	PH	La Conductivité	La Turbidité
1	100	100	6,94	3,17	15
2	50	50	7,54	2,99	16,5
3	100	50	7,77	2,38	5,3

4	0	0	10	2,63	82
5	0	100	7,72	2,51	12,2
6	0	50	10,03	2,68	7,7
7	50	100	8,17	3,02	8,5
8	50	0	9,96	2,63	77
9	100	0	9,97	2,67	40

D'après les résultats obtenus, on observe que la dose de 50 ppm en chlorure de fer à

donné un faible turbidité (7,7).

on remarque la meilleur valeur de turbidité de 5,3 NTU pour une dose de 100 ppm de gel et pour une dose de 50 ppm de gel et une dose de chlorure de fer.

Enfin la diminution des valeurs de turbidité pour toutes les doses ajoutées de coagulant et de floculant ont confirmé l'efficacité de gel de graines de cresson dans la clarification des eaux usées.

Les valeurs de PH et de la conductivité restent légèrement stables.

Tableau III.5. Valeurs du PH, conductivité et turbidité des eaux naturelles traitées par le gel des graines de cresson et le Nitrate d'Aluminium ($Al(NO_3)_3$).

N	Concentration de gel	Concentration de $Al(NO_3)_3$	PH	La Conductivité	La Turbidité
1	100	100	8,75	2,92	45
2	50	50	9,43	2,71	21
3	100	50	9,86	2,72	41
4	0	0	10,02	2,96	82
5	0	100	7,40	2,85	16,9
6	0	50	9,46	2,67	10,4
7	50	100	8,72	1,563	14,9
8	50	0	9,74	1,191	57
9	100	0	9,8	2,83	73

En ce qui concerne les résultats obtenus des nitrate d'aluminium, on remarque la plus faible valeur a été mesurée de 10,4 pour une dose de 50 ppm de $Al(NO_3)_3$, et la valeur de 14,9 pour une dose de 50ppm de gel et 100ppm de $Al(NO_3)_3$.

Les changements des valeurs de PH et conductivité restent légèrement stables ce qui montre que notre gel n'a pas d'effet sur le pH et la conductivité de l'eau.

III.3. Les plans d'expériences

III.3.1. Les eaux Usées : Eau Cimentaire

a . 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 qualités optimales permettant de prédire la réponse calculée à tout les pointes du domaine. Ses divers facteurs, Les variables codées et la matrice du protocole expérimental sont rassemblés dans les tableaux (III.5, III.6).

Tableau III.6. Le champ expérimental des facteurs étudiés

Facteurs	Notation	Quantité		Unité
		Niveau bas (-1)	Niveau haut (1)	
Coagulant	X_1	0	100	Ppm
Floculant	X_2	0	100	Ppm

Tableau III.7. Matrice d'expériences

			Eau Usée +Gel+ $FeCl_3$	Eau Usée +Gel+ $Al(NO_3)_3$
N	Code des variables	Facteurs	Réponse	Réponse

N°	X ₁	X ₂	Gel de cresson (ppm)	Al(NO ₃) FeCl ₃ (ppm)	pH	Conductivité (µs /Cm)	Turbidité (NTU)	pH	Conductivité (µs /Cm)	Turbidité (NTU)
1	1	-1	100	0	6,94	3,17	15	8,75	2,92	45
2	0	0	50	50	754	2,99	16,5	9,34	2,71	21
3	-1	1	0	100	777	2,38	5,3	9,86	2,72	41
4	1	1	100	100	10	2,63	82	10	2,96	82
5	0	-1	50	0	772	2,51	12,2	7,4	285	16,9
6	-1	0	0	50	10	2,68	7,7	9,46	2,67	10,4
7	0	1	50	100	817	3,02	8,5	8,2	1,56	14,9
8	1	0	100	50	996	2,63	77	9,7	1,19	57
9	0	0	50	50	997	2,67	40	9,8	2,83	73

b. Analyse statistiques 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 de la présente étude 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 conductivité et la turbidité.

c. Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance, montre une valeur de P des effets principaux de 0,0169 et 0,0285(<0,05). Cette valeur indique que le modèle est significatif. C'est-à-dire au moins un facteur a un effet significatif sur la réponse.

Tableau.III.8.Analyse de la variance du modèle obtenu.

Analyse de la variance PH				
Source	Degré(s) de liberté	Somme des Carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	5,4942031	1,09884	11,6623
Résidus	4	0,3768869	0,09422	Prob> F
Total	9	5,8710900		0,0169
Analyse de la variance TUR				
Source	Degré(s) de liberté	Somme des Carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	5332,4158	1066,48	13,5453
Résidus	3	236,2042	78,73	Prob > F
Total	8	5568,6200		0,0285

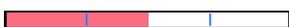
Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation (R^2), les rapports et les probabilités p-value des réponses étudiées (de turbidité, la conductivité et pH) sont regroupés dans les tableaux III.8, III.9 respectivement :

Tableau III.9. Résumé de l'ajustement et estimations des coefficients de la réponse pH selon le critère de la méthode d'analyse utilisée.

Résumé de l'ajustement

R carré	0,935806
R carré ajusté	0,855564
Écart-type résiduel	0,306956
Moyenne de la réponse	9,279
Observations (ou sommes pondérées)	10

Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Rapport t	Prob.> t
AlNO ₃ (0,100)	-0,811667	0,125314	-6,48		0,0029

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Rapport t	Prob.> t
AlNO ₃ *Gel	0,4375	0,153478	2,85		0,0464
AlNO ₃ *AlNO ₃	-0,441429	0,20095	-2,20		0,0930
Gel(0,100)	0,225	0,125314	1,80		0,1470
Gel*Gel	-0,011429	0,20095	-0,06		0,9574

Tableau III.10. Résumé de l'ajustement et estimations des coefficients de la réponse Turbidité.

Résumé de l'ajustement

R carré	0,957583
R carré ajusté	0,886888
Écart-type résiduel	8,873259
Moyenne de la réponse	40,13333
Observations (ou sommes pondérées)	9

Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Rapport t	Prob.> t
AlNO ₃ (0,100)	-22,53333	3,622493	-6,22		0,0084
AlNO ₃ *AlNO ₃	24	6,274341	3,83		0,0315
Gel(0,100)	8,2833333	3,622493	2,29		0,1063
Gel*Gel	13,75	6,274341	2,19		0,1161
AlNO ₃ *Gel	9,275	4,436629	2,09		0,1277

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 ($R^2 = 0.94$, $R^2 = 0.96$), et la valeur du coefficient détermination ajustée est de $R^2 = 0.85$ et 0.88 .

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.9, III.10 et la figure III.1 les coefficients de corrélations des modèles postulés sont généralement relativement élevés ($R^2 = 0.94$ pour PH et $R^2 = 0.96$ pour Turbidité). Ceci montre une bonne corrélation entre les réponses obtenues par les simulations et les valeurs prédites par les modèles ainsi trouvés.

Les coefficients de signe négatif indiquent qu'une augmentation dans la valeur du variable associé fait diminuer la réponse et les coefficients de signe positif indiquent qu'une augmentation dans la valeur du variable fait augmenter la réponse.

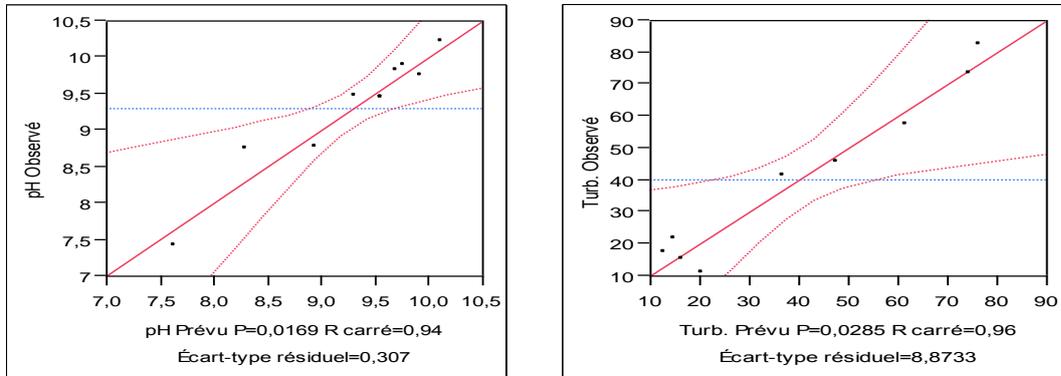
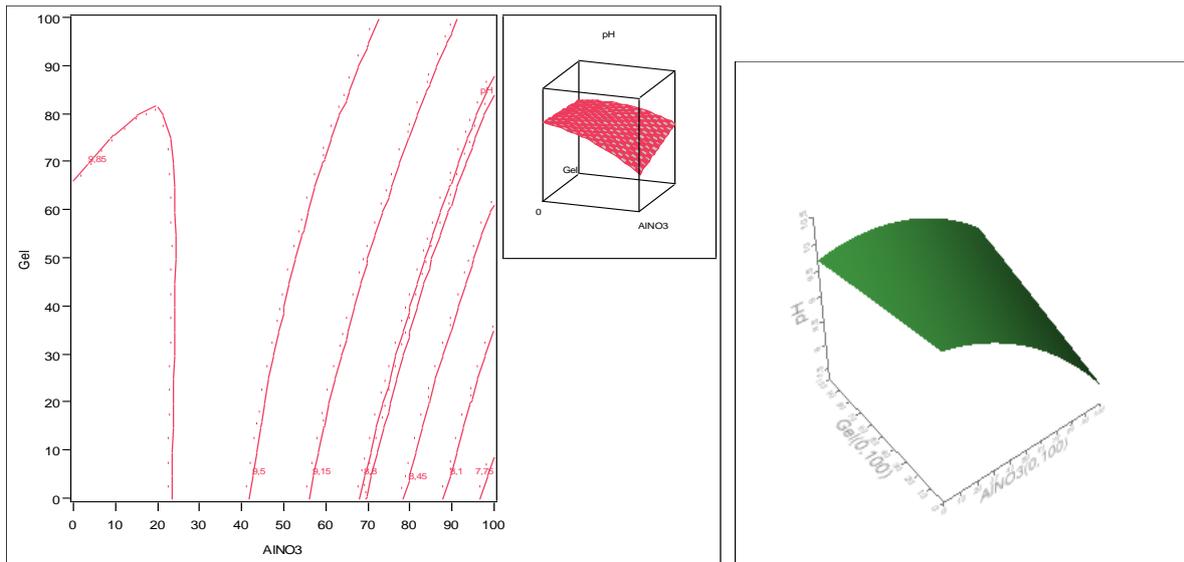


Figure III.1. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la turbidité et PH.

d. Les surfaces de réponses et les courbes iso-réponse (Gel+Al)

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.1, III.2 et III.3.

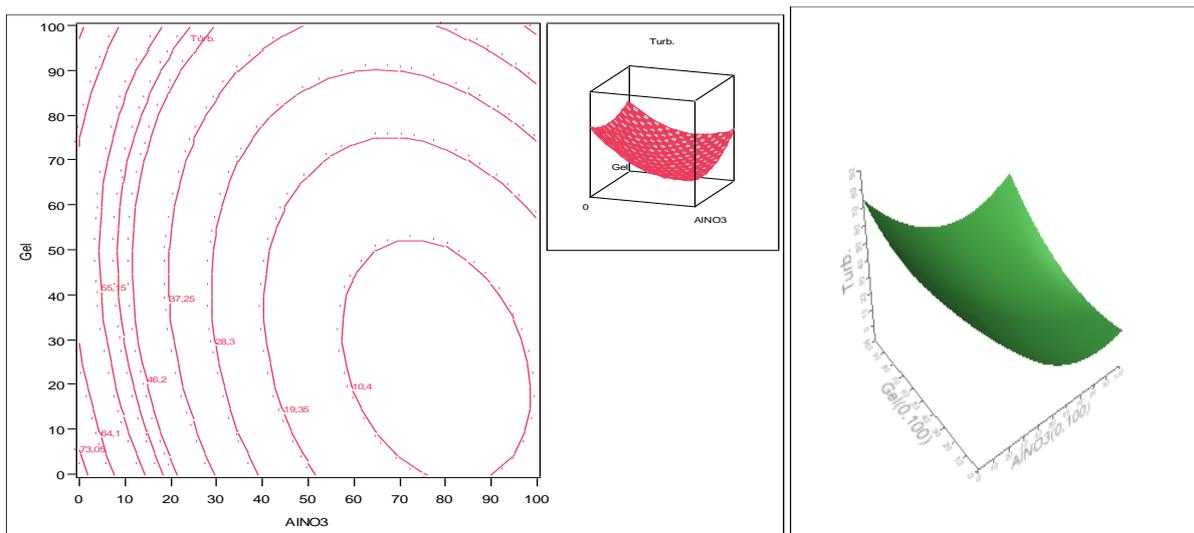
Ces figures permettent de visualiser l'évolution du pH et la turbidité en fonction des facteurs retenus sur toute la plage expérimentale. On peut ainsi titrer directement à partir de ces graphiques, la valeur estimée du paramètre désiré, à n'importe quel point du domaine d'étude. Les résultats de l'analyse de la surface de réponse obtenus, démontre que la variation (l'augmentation du (Gel) et la diminution de (Al)), est suivie d'une augmentation de la turbidité . Une augmentation de la dose du Gel de la borne minimale à la borne maximale s'accompagne d'une augmentation de la turbidité.



Courbes de d'iso-réponses

Courbes de surface de réponse

Figure III.2. Variation de la réponse de pH dans le plan coagulant, floculant.



Courbes de d'iso-réponses

Courbes de surface de réponse

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

e. 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.2, III.3 montre les courbes des contours pour l'effet des variables indépendantes sur la turbidité et le PH. Comme le montre les tableaux III.9, III.10, la turbidité était positivement liée à l'effet linéaire de la concentration de l'aluminium ($p < 0.05$).

Les tableaux montrent qu'il existe un effet d'interaction entre la concentration de gel et de l'aluminium sur la turbidité.

Le pH dépend de la concentration de gel et l'aluminium où les effets linéaire ($p < 0.05$) respectivement, et l'interaction ($p < 0.05$) sont significativement affectés par la concentration de Gel et l'aluminium.

f. 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. La figure III.8 représente les effets de coagulant et le floculant sur Turbidité le logiciel JMP 7.0.

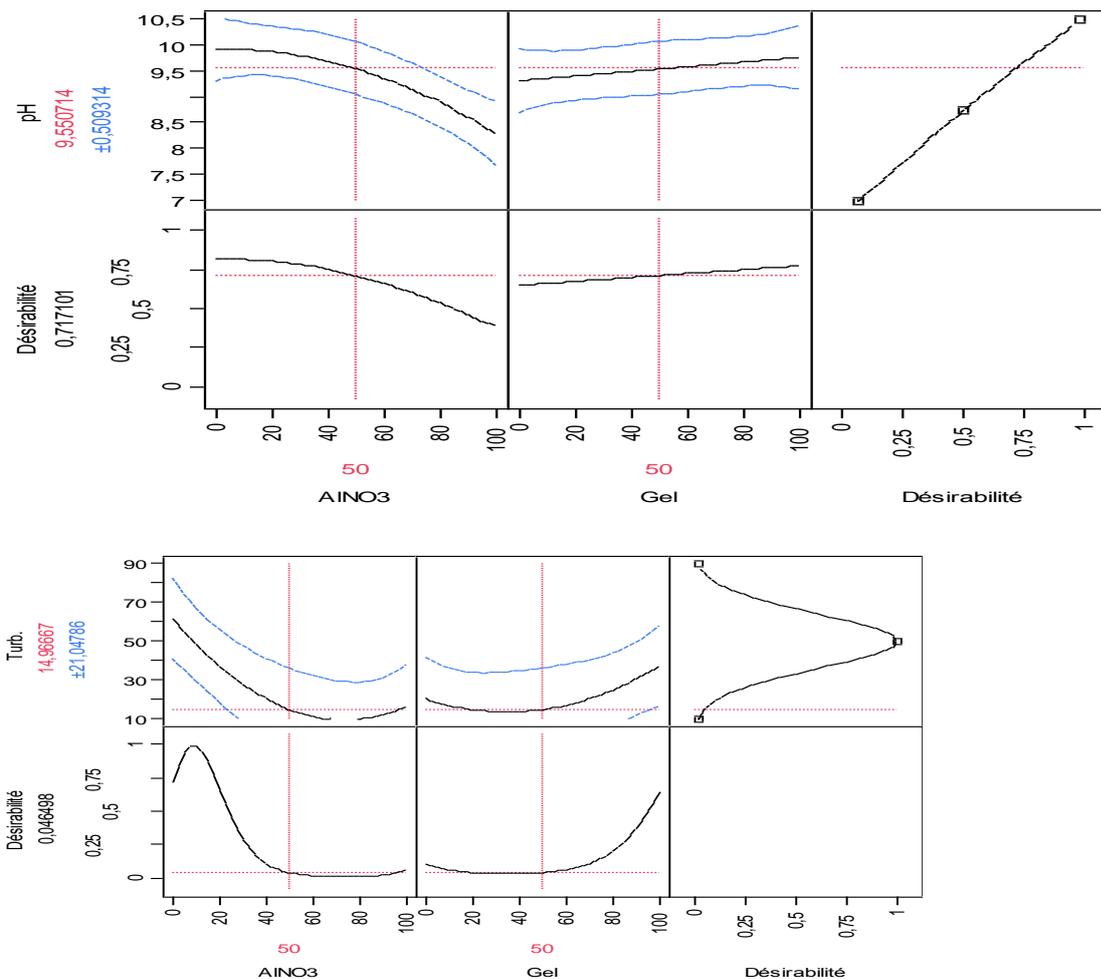


Figure.III.4. Fonction de désirabilité de l'optimisation (Turbidité, pH)

III.3.2. Les eaux naturelles d'El oued de Solite

De la même façon on a obtenu la simulation des valeurs de réponse turbidité, et pH dans les eaux naturelles avec les même coagulants ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$) et FeCl_3) et le floculant (gel des graines de cresson), ci-dessous les différents graphes obtenus.

a. Eau naturelle (Gel+Al)

Ci-dessous les différentes réponses obtenues lors de la simulation des résultats obtenus quand on a ajouté le nitrate d'aluminium et notre gel à l'eau naturelle.

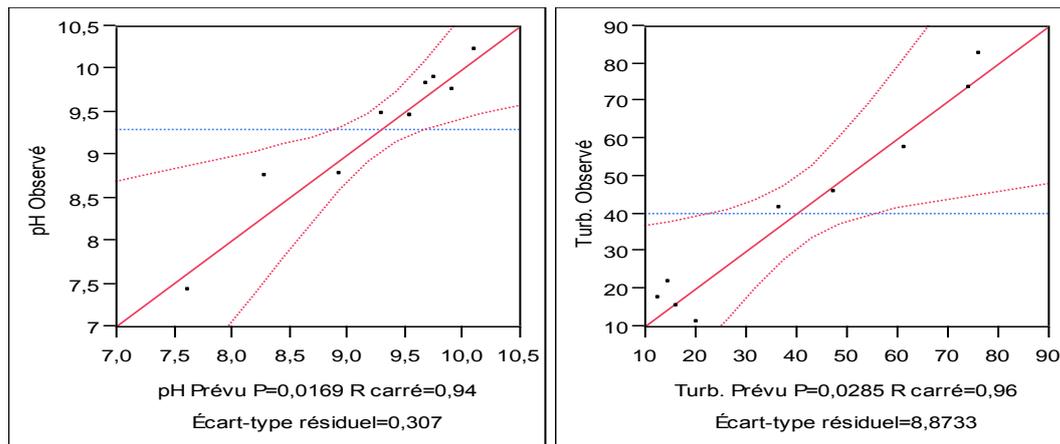


Figure III.5. Réponses théoriques en fonction des réponses estimées.

Le calcul des coefficients de régression avec les données codées est fourni par le logiciel JMP 7.0. Les valeurs du coefficient de détermination $R^2 = 0.94$ et $R^2 = 0.96$ sont bonnes, ce qui indique que le modèle est relativement bien ajusté. Donc il existe une bonne corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées.

L'analyse de la variance (ANOVA) montre que tous les termes sont hautement significatifs ($p\text{-value } 0.0169 < 0.05$, $0.0285 < 0.05$) pour la turbidité et pH respectivement.

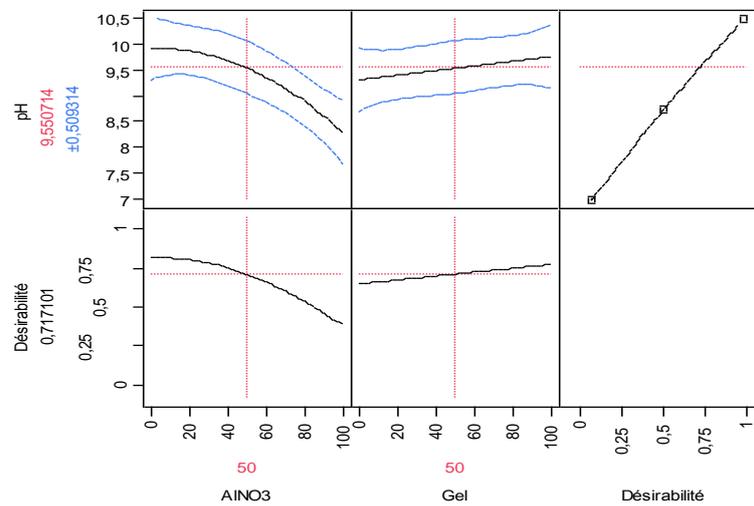
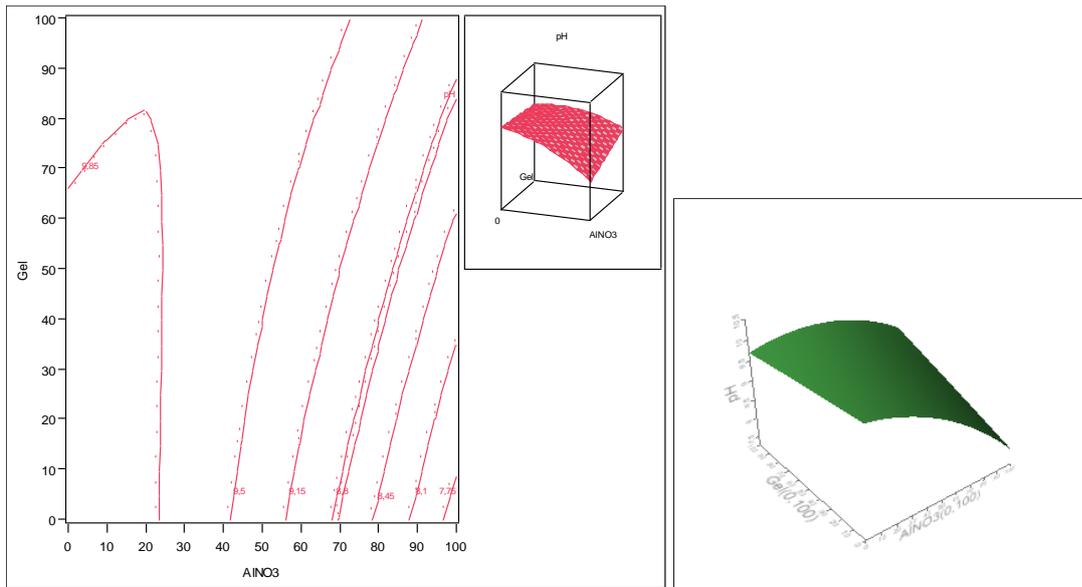


Figure III.6. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, Fonction de désirabilité de l'optimisation et Variation de la réponse de PH.

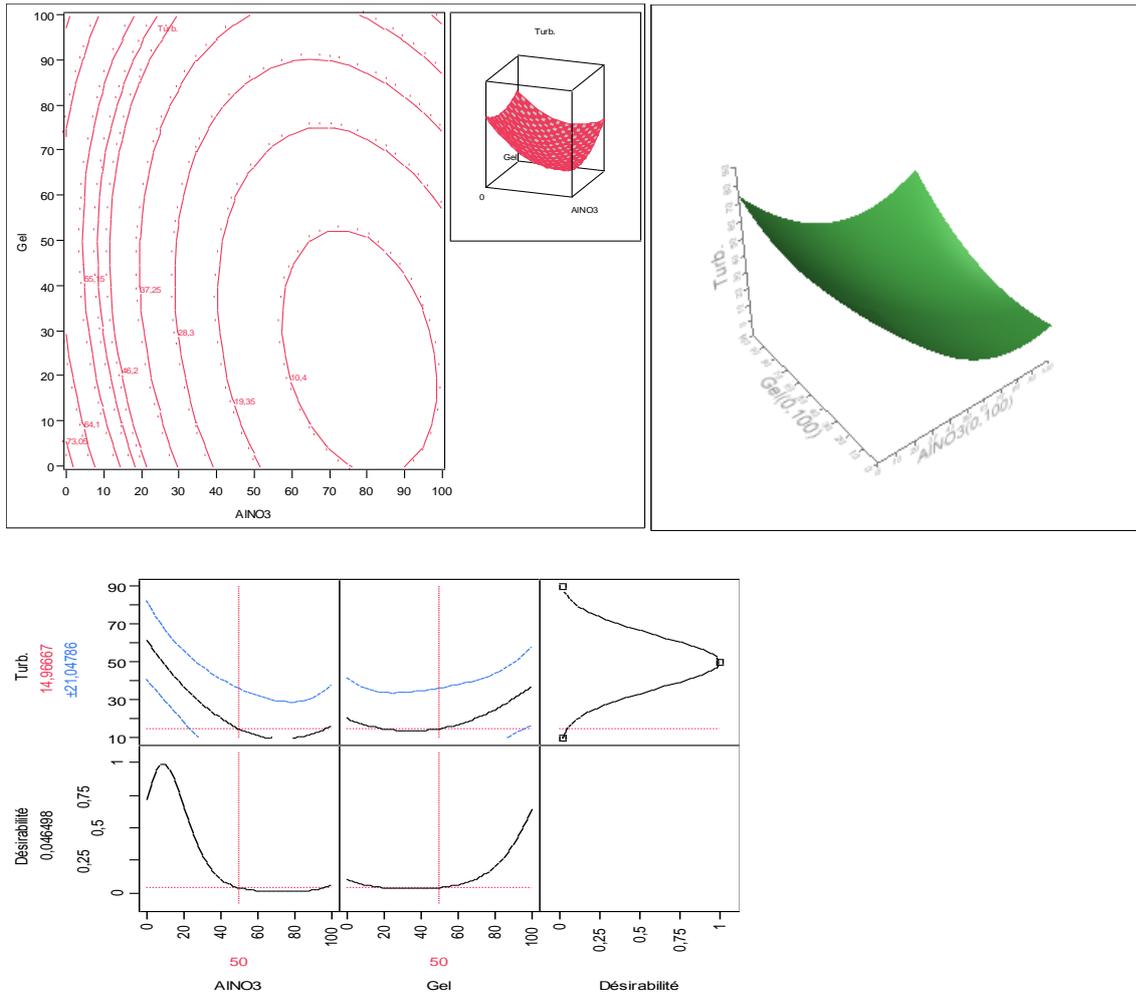


Figure III.7. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, Fonction de désirabilité de l'optimisation et Variation de la réponse de la turbidité.

L'analyse des résultats, avec une désirabilité de la turbidité et pH, nous aide à trouver les réglages des paramètres de traitement. Les figures ci-dessous permettent de visualiser l'évolution de la turbidité et pH en fonction des facteurs sur toute la plage expérimentale. 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.

b. Eau naturelle (Gel+FeCl₃)

La corrélation peut aussi être illustrée en traçant les réponses mesurées, en fonction des réponses estimées. Ceci est donné par la figure III.8, qui montre une forte corrélation entre les différents facteurs.

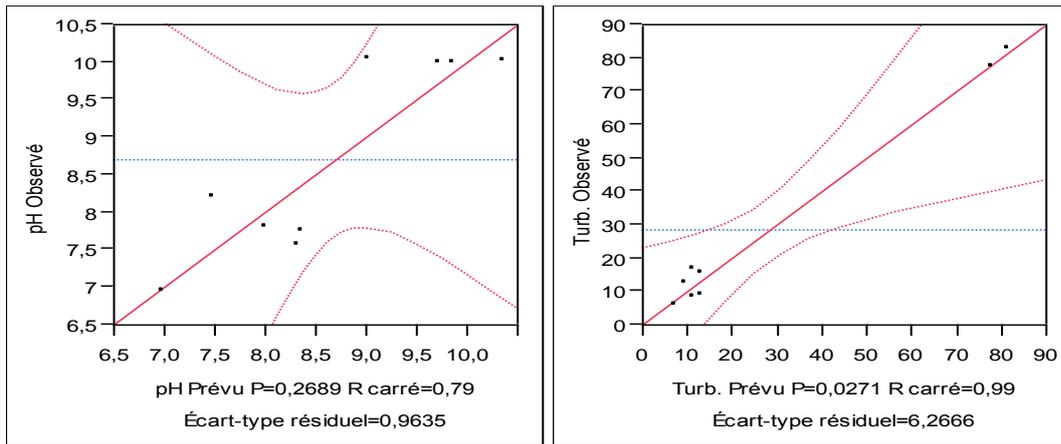


Figure III.8. Réponses théoriques en fonction des réponses estimées.

Le calcul des coefficients de régression avec les données codée est fourni par le logiciel **JMP 7.0**. Les valeurs du coefficient de détermination $R^2 = 0.79$ et $R^2 = 0.99$ sont bonne, ce qui indique que le modèle est relativement bien ajusté. Donc il existe une bonne corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées.

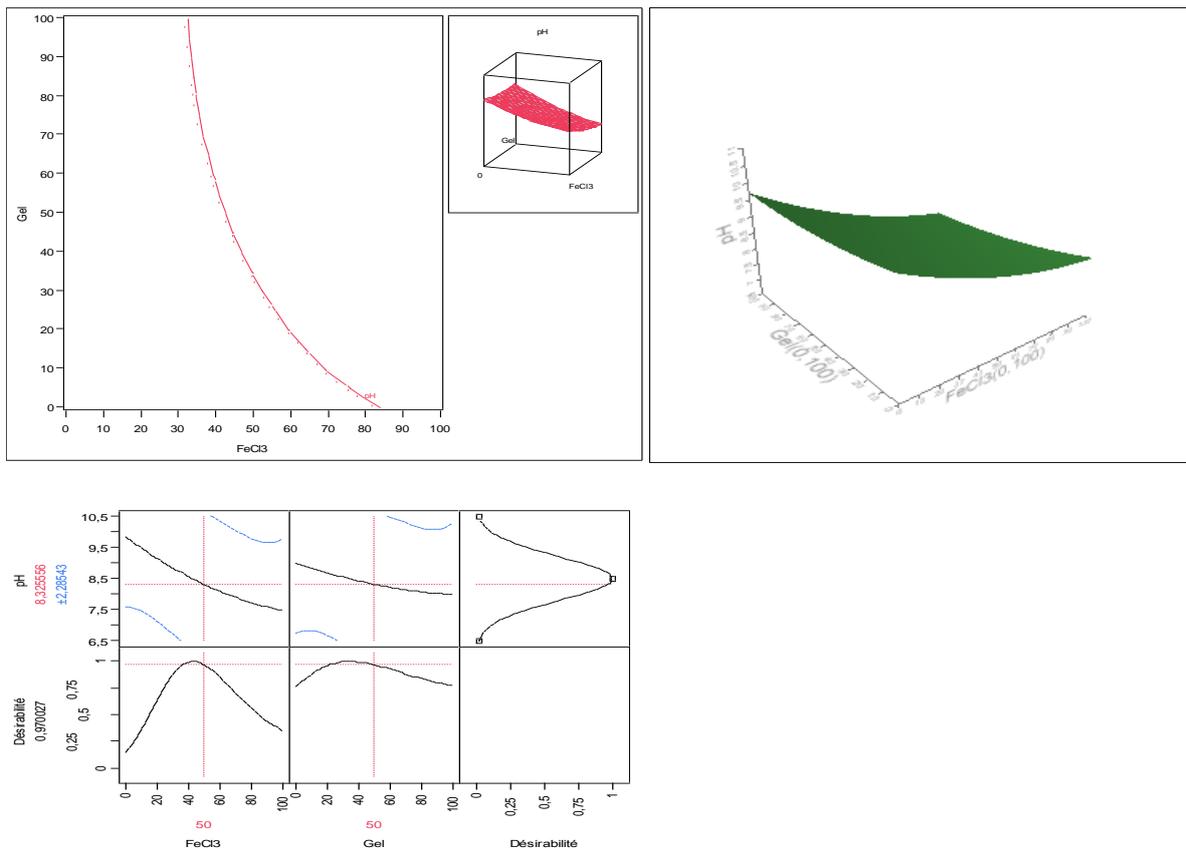
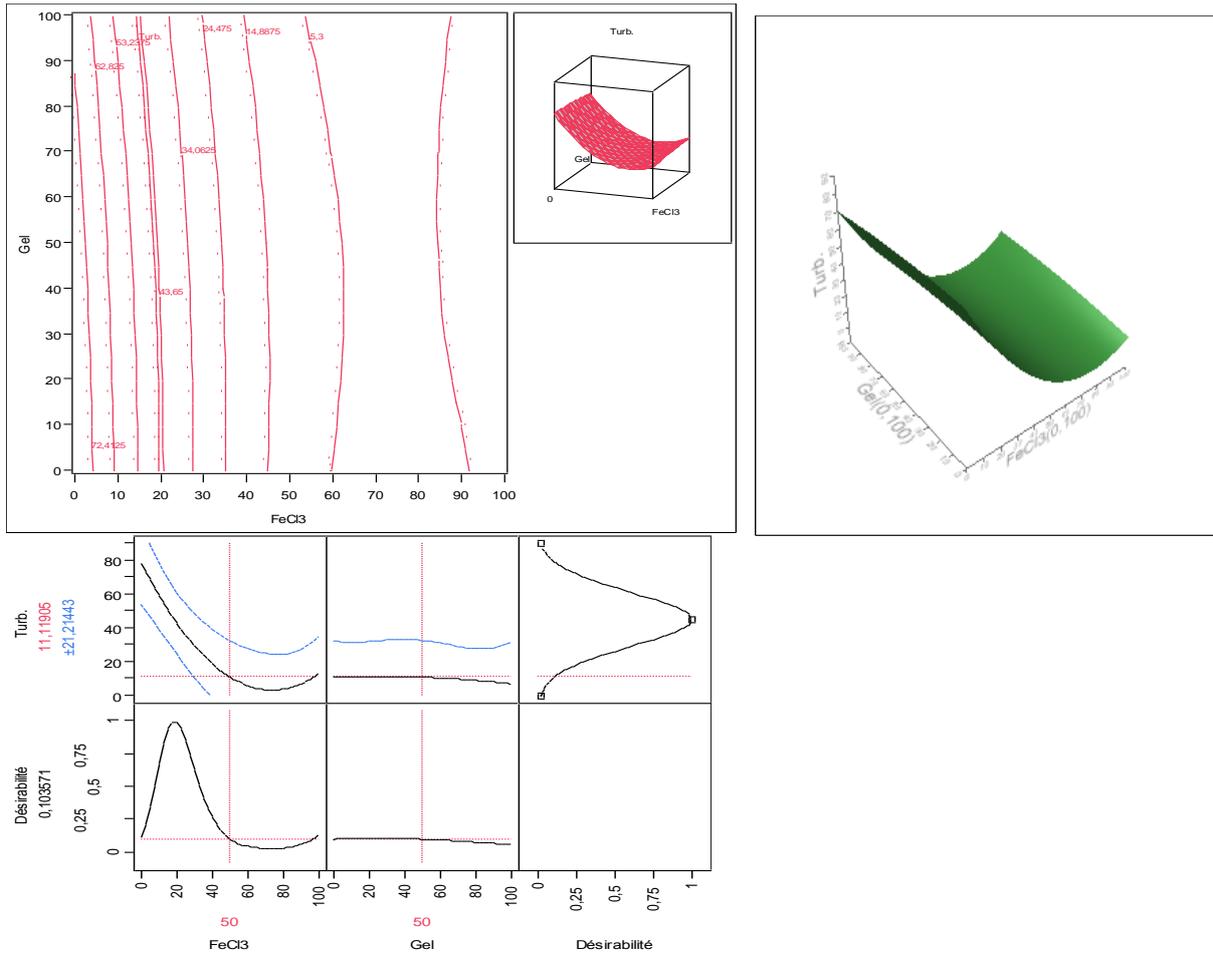


Figure III.9. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, Fonction de désirabilité de l'optimisation et Variation de la réponse de PH.



III.10. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, Fonction de désirabilité de l’optimisation et Variation de la réponse de turbidité.

L’analyse de la variance (ANOVA) montre que le terme est hautement significatifs (P-value $0.0271 < 0.05$) pour la turbidité. Par contre, Il n’y a donc pas d’effet significatif pour le pH ou P-value $0.2689 > 0.05$.

III.4. Conclusion

Au cours de ce chapitre, l’objectif était d’étudier l’efficacité de gel des graines de cresson dans le procédé de clarification des eaux naturelles et des eaux usées par le processus de coagulation-floculation en essayant de réduire ou de remplacer le coagulant utilisé fréquemment (nitrate d’aluminium ou chlorure de fer) dans le traitement des eaux par le gel des graines de cresson.

Préalablement, des essais d’optimisation de la coagulation-floculation selon le protocole expérimental du jar-Test.

Nous avons retenu deux (02) facteurs contrôlables (quantité de coagulant et quantité de floculant). Nous avons appliqué sur ces facteurs la méthode du plan d'expériences (plan de surface) à l'aide du logiciel JMP 7.0.

Conclusion générale

Notre travail a pour objectif l'étude de l'efficacité d'un flocculant naturel (gel de graines de cresson) dans le procédé de clarification des eaux.

Dans ce travail nous avons étudié plus particulièrement l'élimination de la turbidité qui représente un problème principal des eaux. Afin de cerner au mieux la problématique du thème choisi, l'élaboration d'une synthèse bibliographique a été nécessaire.

La première partie du mémoire a donc consisté en un état des connaissances sur les différents propriétés des eaux et procédés de traitement des eaux de surface en particulier le procédé de coagulation-floculation.

La seconde partie de notre travail a été consacrée à l'ensemble des méthodes et matériels utilisés dans les essais expérimentaux que nous avons réalisés dans le cadre de cette étude.

Cette partie a permis la description détaillée des réactifs utilisés ainsi que des protocoles expérimentaux suivis en cours des essais. Ces essais ont été réalisés sur deux types d'eau, une eau naturelle et une autre usée.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à déterminer les caractéristiques physico-chimique des eaux traitées.

Les résultats des essais de coagulation-floculation selon le protocole de JARTEST font ressortir les conclusions suivantes :

- ✓ L'ajout de chlorure de fer comme coagulant et le gel des graines de cresson comme flocculant ont donné des résultats plus efficaces que le nitrate d'aluminium dans les eaux naturelles.
- ✓ Dans les eaux usées les résultats ont été meilleurs pour les deux coagulants en présence de notre flocculant ; ce qui confirme l'efficacité de notre flocculant dans le procédé de clarification.
- ✓ A travers les expériences effectuées, nous avons essayé de répondre à la problématique posée en faisant le suivi des différents facteurs du traitement de l'eau polluée.

Nous avons retenu deux(02) facteurs contrôlables (quantité de coagulant, et quantité de flocculant). Nous avons appliqué sur ces facteurs la méthode des plans d'expérience (plan de surface) à l'aide du logiciel JMP 7.0.

- ✓ L'optimisation à l'aide du plan d'expériences, le modèle mathématique du plan de surface, a été significatif dans les eaux usées par contre il a été non significatif en point de vue statistique dans les eaux naturelles.

Références

- [1]. C BLIEFRT. R PERRAUD. Chimie de l'environnement :air, eau, sols, déchets.
P :271, 290,291.
- [2]. J.C BOEGLIN. Propriétés des eaux naturelles. Technique de l'ingénieur, traité environnement, G1 110.
- [3]. DEGREMONT. Mémento technique de l'eau, Technique et documentation, tome1, 1989, p :5, 24,25.
- [4]. RODIER J. LEGUBE, BMERLET N& coll.(2009). L'Analyse de l'eau.9ème édition, Dunod, paris, pp :1-33.
- [5]. TARDAT HENRY M, BEAURY J.P.(1984). Chimie des eaux, Ed. Le Griffon d'argille INC, Canada.
- [6]. POTELON.J.L, ZYMANK (1998).Le guide des analyses d'eau potable, La lettre du cadre territorial.
- [7]. LALLOGO H. (1992). Concentration de certains métaux d'importance médicale dans les poisons: cas des poisons de la lagune de Lomé. Mémoire de Technicien Supérieur en Génie Sanitaire (EAM), UL, p: 36.
- [8]. DEGREMONT, «Mémento technique de l'eau », Deuxième édition Tom1, (2005). 39-50.
- [9]. A.KHADRAOUI, S .TALEB, « Qualité des eaux dans le sud algérien (potabilité pollution et impact sur le milieu) », (2008).
- [10]. Dégrément, « Mémento technique de l'eau », Première édition, (1952).
- [11]. A. Dupont, Hydrologie-captage et traitement des eaux, HYDRAULIQUE, Tome 1, Ed 5, Paris (1981).
- [12]. H.TARDATH et J.P.BEAUDRY, « chimie des eaux, les griffons d'argile », (1984).
- [13]. HENRI ROQUE, « Fondement théorique du traitement chimique des eaux » vol. I et II, technique et documentation, Lavoisier, Paris (1990).
- [14]. H.OUAHRANI, « Suivie de la stabilité des paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'eau », Université de Bejaia, (2012).
- [15]. RANSOM B., Shea K. F., Burkett P. J., Bennett R. H. et Baerwald R. (1998). Comparison of pelagic and nepheloid layer marine snow: implications for carbon cycling, M Université Abderrahmane MIRA de Bejaia.
- [16]. Directives de qualité pour l'eau de boisson Genève. OMS, 1985-86.

- [17] REDOUANE AMINE et AOUALI Abdelmalek, 2012, Caractérisation physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Agrioun de la région de Bejaia. Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Ecologie et Environnement.
- [18].GAUJOUS D.,1995 ,La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire. Technique et documentation, 2^{ème} édition Lavoisier, Pris.
- [19]. F MEKHALIF.,2009, Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement. Mémoire de magister, Université de Skikda, Algérie.
- [20]. MOttot Y., (2000). Coagulants et floculants, Texte des 279 conférences de l'Université de tous les savoirs.
- [21]. Benefield, judkins & Weand., (1982). Procès Chemistry for Water and Wastewater Treatment. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 510 p.
- [22]. Ezziane S., (2007). « Traitement des eaux de rejets de l'unité de TENES » mémoire de Magister Université de Chlef.
- [23].Desjardins C., (1999). Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée (actiflo) à l'aide d'une procédure modifiée de jar-test, mémoire pour l'obtention du diplôme de maitrisées sciences appliqués, Ecole polytechnique de Montréal, Canada.
- [24].Dégriment (1978). mémento technique de l'eau , 8ème édition. Edition Technique
- [25].Desjardins R., (1997). Le traitement des eaux. 2ème édition. Ed. Ecole polytechnique. de Montréal, 2ème édition revue et améliorée.
- [26].Ezziane S., (2007). « Traitement des eaux de rejets de l'unité de TENES » mémoire de Magister Université de Chlef.
- [27].Kherifi W., (2009). étude de la cinétique de sédimentation des matières en suspension dans le calcul des décanteurs, mémoire de magistère, Université badji-Mokhtar-Annaba.
- [28]. Dakkiche B., (2018). (Elimination du cuivre présent dans les eaux usées industrielles par coagulation – floculation en utilisant le sulfate d'aluminium – comparaison avec le chlorure ferrique). Mémoire de Master en Hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [29]. Kane M.B., (2017). (Analyse et traitement des eaux d'Oued Fès par le procédé de coagulation-floculation) MEMOIRE DE FIN D'ETUDES Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques Université de Fès.
- [30]. Belarbi F (2000). « Etude comparative de l'effet des caractéristiques physicochimique des particules solides sur la coagulation-floculation » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Génie Rural Université de Blida.

- [31]. Larakeb M., (2015). « Elimination du Zinc par adsorption et par coagulation floculation », thèse de doctorat LMD en hydraulique, université de Biskra.
- [32]. Cardot G., (2005). Génie de l'environnement ; Les traitements de l'eau procédés physicochimiques et biologiques cours et problèmes résolus, Edition Ellipse.
- [33]. Hector Ricardo Hernández De León., (2006) « Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable», Thèse de doctorat à l'institut nationale des sciences appliquées de Toulouse.
- [34]. Prévost M., (2010). Traitements physico-chimiques. Notes du cours CIV8210. École Polytechnique de Montréal.
- [35]. Gallard H., Gunten U.V., (2002). Chlorination of natural organic matter: kinetics of chlorination and of THM formation, Water Res. 36 (2002) 65–74.
- [36]. https://www.passeportsante.net/fr/Nutrition/EncyclopedieAliments/Fiche.aspx?doc=cresson_nu#:~:text=Fer%20%3A%20le%20cresson%20al%C3%A9nois%20cru,est%20une%20source%20de%20potassium.
- [37]. GOUPY « Introduction aux Plans d'expériences ». Dunod . Paris .303 pages.(2001)
- [38]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Lin_cultiv%C3%A9 Consulté le 19 Octobre 2019.
- [39]. Goupy J. and Creighton L. "Introduction to design of experiments with JMP examples, Third edition", Cary, NC: SAS Institute Inc, 2007, pp. 473.

Résumé

L'objectif essentiel du présent travail est l'étude de l'efficacité d'un floculant naturel (gel des graines de cresson) sur les traitements des eaux dans le procédé de coagulation-floculation basé sur l'utilisation du chlorure de fer et nitrate d'aluminium comme coagulants. Ce procédé a démontré l'efficacité de ce gel dans la clarification de l'eau.

Mots clés

Coagulation-floculation, coagulant, floculant, efficacité

Abstract

The main objective of this work is the study of the effectiveness of a natural flocculant (gel of watercress seeds) on water treatment in the coagulation-flocculation process based on the use of iron chloride and nitrate. Aluminum as coagulants. This process has demonstrated the effectiveness of this gel in clarifying water.

Keywords

Coagulation-floculation, coagulant, flocculant, efficiency

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة فعالية مادة الندف الطبيعي (هلام بذور الجرجير) في معالجة المياه في عملية التخثر والتلبد بالاعتماد على استخدام كلوريد الحديد ونترات الألمنيوم كمخثرات. أثبتت هذه العملية فعالية هذا الجل في تصفية الماء.

الكلمات الدالة

التخثر، التلبد، التخثر، الندف، الكفاءة