

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



Mémoire

Présenté par

CHATBI Ryma

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière: GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie chimique

**Application des plans d'expériences pour la
modélisation du procédé de
coagulation-floculation de l'eau brute du barrage
KOUDIAT ACERDOUNE**

Soutenu le : 08 /11 /2020

Devant le jury composé de :

Mme A. ZAABAR	Maître de Conférences A	UAMO, Bouira	Examinatrice
Mme S. AITALI	Maître de Conférences B	UAMO, Bouira	Examinatrice
Mme S. ZIANI	Maître de Conférences A	UAMO, Bouira	Encadrant
Mr Kadi	Chef de Département	UPKA, Bouira	Co-Encadrant

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu l'unique, le puissant, ... qui a illuminé mon chemin et qui m'a donné le courage et de la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je remercie infiniment Mme S. Ziani, pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant de m'encadrer, pour son aide et sa disponibilité durant toute cette période.

Mes sincères remerciements vont aux membres du jury : Mme A. ZAABAR et Mme S. AITALI, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Un grand merci à Mr Kadi et l'ensemble du personnel du laboratoire de la Station de Traitement Koudiat Acerdoune pour leur accueil et leur aide durant ma période de stage.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

A celle qui m'a donné la vie, à la source d'amour, à celle qui était à mes côtés et m'a soutenu depuis toujours, ma mère.

A mon cher papa, mon frère Yacine et ma petite sœur Yasmine.

A toutes les personnes de ma grande famille.

A mes chers amis : Nasser, Islam, Radhia, Nadia et Soumia.

Table des matières

Sommaire

Liste des abréviations.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des tableaux.....	IV
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Contexte d'étude et analyse bibliographique	
I .1.Pollution des eaux de surface.....	4
I .1.1.Origine de la pollution.....	4
I .1.1.1.Origine agricole.....	4
I .1.1.2.Origine industrielle.....	4
I .1.1.3.Origine domestique.....	5
I .1.1.4.Origine naturelle.....	6
I .1.1.5.Origine associée au traitement de l'eau.....	6
I .1.2.Types de pollution de l'eau.....	6
I .1.2.1.Pollution chimique.....	6
I .1.2.2.Pollution physique.....	7
I .1.2.3.Pollution biologique.....	7
I .1.3.Impact de la pollution.....	7
I .1.3.1.Sur la santé humaine.....	7
I .1.3.2.Sur l'environnement.....	7
I .2.Eaux de surface, qualité et traitement.....	8
I .2.1.Descripteurs de la qualité de l'eau.....	8
I .1.2.1.1.Température.....	8
I .1.2.1.2.Couleur.....	8
I .1.2.1.3.pH.....	8
I .1.2.1.4.Matières en suspension (MES).....	9

I .1.2.1.5.Conductivité.....	9
I .1.2.1.6.Turbidité.....	9
I .1.2.1.7.Demande biochimique en Oxygène à cinq jours(DBO5).....	9
I .1.2.1.8.Demande chimique en oxygène (DCO).....	9
I .1.2.1.9.Carbone organique total (COT).....	10
I .2.2.Procédés de traitement.....	10
I .2.2.1.Pré-chloration.....	10
I .2.2.2.Coagulation-floculation.....	10
I .2.2.3.Décantation.....	11
I .2.2.4.Filtration.....	11
I .2.2.5.Désinfection.....	12
I .3.Clarification des eaux par coagulation-floculation.....	12
I .4.Synthèse des travaux antérieurs réalisés sur la coagulation-floculation.....	13
Références bibliographiques.....	16
Chapitre II : plans d'expérience	
II .1.Définition d'un plan d'expériences.....	18
II .2.Principe des plans d'expériences.....	18
II .3.Avantages des plans d'expériences.....	19
II .4.Types des plans d'expériences.....	20
II .5.Plans factoriels complets à deux niveaux (2k).....	20
II .5.1.Modèle mathématique associé aux plans factoriels complets.....	22
II .5.2.Calcul des coefficients du modèle.....	23
II .6.Analyse statistique.....	24
II .6.1.Vérification de la signification des coefficients.....	24
II .6.2.Validation du modèle.....	25
Références bibliographiques.....	28

Chapitre III : mise en œuvre expérimentale

III.1.Détermination des caractéristiques de l'eau brute à traiter.....	29
III.2.Procédure de traitement de l'eau brute.....	29
III.2.1.Préparation des réactifs de traitement.....	29
III.2.2.Description du montage.....	31
III.2.3.Protocole expérimental.....	32
III.3.Détermination des caractéristiques de l'eau traitée.....	33
III.3.1.Détermination de la teneur en aluminium.....	33
Références bibliographiques.....	34

Chapitre IV : modélisation du procédé de coagulation-floculation

IV.1.Plan d'expérimentation.....	35
IV.2.Elaboration du modèle de premier degré.....	35
IV.2.1.Modèles obtenus sans ajout de floculant.....	36
IV.2.1.1.Calcul des coefficients des modèles.....	37
IV.2.2.Modèles obtenus avec ajout de floculant.....	38
IV.2.2.1.Calcul des coefficients des modèles.....	39
IV.3.Analyse statistique des équations de régression.....	40
IV.3.1.Vérification de la signification des coefficients.....	40
IV.3.2.Vérification de la validation du modèle.....	42
IV.3.3.Evaluation de la qualité des modèles.....	44
IV.4.Exploitation des modèles de 1er degré.....	48
IV.4.1.Effet des paramètres linéaires et d'interaction.....	48
IV.4.1.1.En absence du floculant.....	48
IV.4.1.2.En présence du floculant.....	49
IV.5.Détermination des conditions optimales.....	50

IV.5.1.En absence du flocculant.....	50
IV.5.1.1.pH.....	50
IV.5.1.2.Turbidité.....	51
IV.5.1.3.Teneur en aluminium.....	51
IV.5.2.En présence du flocculant.....	52
IV.5.2.1.pH.....	52
IV.5.2.2.Turbidité.....	53
IV.5.2.3.Teneur en aluminium.....	53
Références bibliographiques.....	55
Conclusion générale.....	56
Annexes	

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

CAG : charbon actif en grains

CAP : Charbon actif en poudre

COT : Carbone Organique Total

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en Oxygène

MES : Matières En Suspension

PFC : Plan Factoriel Complet

pH : Potentiel d'Hydrogène

SA : Sulfate d'aluminium

SAA : Spectrométrie d'Adsorption Atomique

Liste des figures

Figure I.1 : Exemple de la pollution agricole.....	4
Figure I.2 : Exemple de la pollution industrielle.....	5
Figure I.3 : Exemple de la pollution domestique.....	5
Figure I.4 : Exemple de la pollution naturelle.....	6
Figure I.5 : Bassin de décantation.....	11
Figure I.6 : Bassins de filtration.....	11
Figure I.7 : Schéma représentatif du phénomène de coagulation-floculation.....	13
Figure II.1 : Schéma représentatif du contexte de la boite noire et du principe des plans d'expériences.....	19
Figure II-2 : Disposition des points expérimentaux d'un plan (2^3).....	21
Figure III.1 : Formule développée du sulfate d'alumine.....	30
Figure III.2 : Chaîne de polymérisation du flocculant anionique.....	31
Figure III.3 : Jar-test SB.....	32
Figure III.4 : Solutions de mesure de la teneur en aluminium pour les différentes eaux traitées.....	34
Figure IV.1 : Diagramme des résidus du modèle de pH obtenu en absence du flocculant.....	47
Figure IV.2 : Diagramme des résidus du modèle de la turbidité obtenu en absence du flocculant.....	47

Figure IV.3 : Diagramme des résidus du modèle de pH obtenu en présence du flocculant.....	48
Figure IV.4 : Evolution du pH en fonction de la concentration en absence du flocculant.....	50
Figure IV.5 : Evolution de la turbidité en fonction de la concentration en absence du flocculant.....	51
Figure IV.6 : Evolution de la teneur en aluminium en fonction de la concentration en absence du flocculant.....	52
Figure IV.7 : Evolution du pH en fonction de la concentration en présence du flocculant.....	52
Figure IV.8 : Evolution de la turbidité en fonction de la concentration en présence du flocculant.....	53
Figure IV.9 : Evolution de la teneur en aluminium en fonction de la concentration en présence du flocculant.....	54

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Matrice des expériences (N, k).....	21
Tableau IV.1 : Valeurs des paramètres opératoires à différents niveaux.....	35
Tableau IV.2 : Matrice des expériences pour l'étude du procédé sans ajout de flocculant.....	36
Tableau IV.3 : Valeurs du pH, de la turbidité et de la teneur en aluminium au centre du domaine d'étude en absence du flocculant.....	37
Tableau IV.4 : Valeurs des coefficients des modèles de variation de pH, de turbidité et de teneur en aluminium en absence du flocculant.....	38
Tableau IV.5 : Matrice des expériences pour l'étude du procédé avec ajout de flocculant.....	38
Tableau IV.6 : Valeurs du pH, de la turbidité et de la teneur en aluminium au centre du domaine d'étude en présence du flocculant.....	39
Tableau IV.7 : Valeurs des coefficients des modèles de variation de pH, de turbidité et de teneur en aluminium en présence du flocculant.....	39
Tableau IV.8 : Valeurs des variances de reproductibilité et des écarts types des modèles postulés en absence et en présence du flocculant.....	40
Tableau IV.9 : Valeurs $dest_j$ des modèles de variation de pH, de turbidité et de teneur en aluminium en absence du flocculant.....	40
Tableau IV.10 : Valeurs $dest_j$ des modèles de variation de pH, de turbidité et de teneur en aluminium en présence du flocculant.....	41
Tableau IV.11 : Valeurs des variances de régression, des Fisher calculées et tabulées des modèles postulés.....	42
Tableau IV.12 : Valeurs des Fisher calculées et tabulées des modèles postulés en présence et en absence du flocculant.....	43
Tableau IV.13 : Valeurs des coefficients de détermination des modèles postulés en présence et en absence du flocculant.....	44

Tableau IV.15 : Valeurs des erreurs relatives aux frontières du domaine d'étude dans le cas des modèles obtenus en présence du flocculant.....	46
Tableau IV.16 : Caractéristiques physicochimiques de l'eau brute à traiter.....	50

Introduction générale

Introduction générale

L'eau représente la vie sur la terre, c'est un bien économique, social et environnemental. De toute l'eau contenue sur terre (70% du globe terrestre), seulement 0,65 % qui est convenable à la consommation humaine, et doit, sans doute, satisfaire le besoin de toute la population mondiale. Au fait, cette eau utilisée est alimentée par un cours d'eau, une nappe phréatique, une source ou un barrage. Pour cela, il est nécessaire de la traiter afin d'améliorer ses caractéristiques dans le but de la rendre potable [1].

L'eau brute captée en milieu naturel n'est pas toujours potable, même si elle est d'apparence limpide, elle transporte toutes sortes de substances inertes et vivantes qui peuvent être nocives pour l'organisme humain. L'origine de ces substances est soit le milieu physique dans lequel l'eau a évolué, soit les rejets des activités humaines dont l'eau est devenue le réceptacle [2].

Dans le but de définir la potabilité d'une eau, des normes ont été établies pour fixer les concentrations limites à ne pas dépasser pour les substances nocives qui peuvent être présentes dans l'eau. Une eau qui est conforme aux normes et potable n'est pas forcément exempte de matières polluantes, mais sa teneur en ces substances est très faible pour ne pas mettre la santé du consommateur en danger. De même, une eau potable doit aussi être une eau agréable à boire, elle doit être claire et avoir une bonne odeur et un bon goût. Pour cela, elle doit contenir un minimum de sels minéraux dissous (entre 0,1 et 0,5 g/L), qui sont d'autre part indispensables à l'organisme. En outre, elle ne doit pas corroder les canalisations afin d'arriver propre à la sortie des robinets des consommateurs.

Dans le contexte de ce cahier des charges si strictes, le choix des procédés de traitement destinés à assurer la potabilité de l'eau produite selon les normes devient cruciale et nécessite impérativement une étude approfondie. Au fait, les procédés mécaniques et physiques comme le dégrillage, le dessablage et les traitements biologiques par boues activées permettent d'éliminer une grande partie des matières contenues dans l'eau. Néanmoins, l'eau contient toujours une quantité des substances composées de matières en suspension, de colloïdes et des particules très fines difficilement décantables.

Introduction générale

Pour éliminer ces particules tenaces, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est-à-dire de faciliter leur agglomération. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion de produits chimiques. La floculation a pour but de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Au final, ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on pourra facilement éliminer par décantation [3].

Le présent travail a pour objectif d'étudier les différents paramètres ayant une influence sur le procédé de coagulation-floculation appliqué pour le traitement des eaux brutes du barrage de KOUDIAT ACERDOUNE, situé dans la wilaya de Bouira. Pour cela, nous avons fait appel à la méthode de planification des expériences qui permet de trouver, avec le minimum d'essais, les conditions optimales du procédé.

En se basant sur ces objectifs, nous avons subdivisé ce mémoire en quatre chapitres :

Les deux premiers chapitres sont consacrés à une étude bibliographique qui comprend les différents types de pollution, leurs origines et leurs impacts sur la santé humaine et l'environnement, ainsi que les différents procédés de traitement, et une idée générale sur la méthodologie des plans d'expériences.

Le troisième chapitre, définit les étapes de préparations des réactifs utilisés et leurs caractéristiques, le protocole expérimental des essais de jar-test et les différentes méthodes d'analyse.

Le quatrième chapitre, décrit la partie modélisation du procédé de coagulation-floculation. Il expose toutes les étapes suivies lors de l'élaboration des modèles de 1^{er} degré et toutes les interprétations adaptées pour les valider et les exploiter.

Une conclusion générale résumant l'ensemble des résultats obtenus et la présentation de quelques perspectives clôture cette étude.

Références bibliographiques

- [1] Z. Bakiri, Traitement des eaux usées par des procédés biologiques classiques : expérimentation et modélisation, Mémoire de Magister, Université de Sétif, Algérie, 2007.
- [2] Z. Kouidri, Etude et traitement de l'eau du barrage Djorf-El Torba de la wilaya de Bechar par filtration sur sable, Mémoire de Magister, Université de Chlef, Algérie, 2006.
- [3] K. Bensadok, procédé de traitement d'émulsion huile/ eau et eau/ huile cas particulier d'émulsion d'huile de coupe, Thèse de Doctorat, Université Houari Boumediene, Algérie, 2007.

Chapitre I

Contexte d'étude, analyse bibliographique

Ce chapitre représente une synthèse et analyse générale du sujet d'étude. Il cadre son contexte et donne un certain nombre de renseignements relatifs à la problématique de la pollution des eaux de surface. Eau, ce patrimoine mondial de l'humanité qui doit non seulement être protégé mais aussi respecté ...!

I.1 Pollution des eaux de surface

I.1.1. Origine de la pollution

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique ou biologique de ses qualités naturelles. Cette dégradation peut être engendrée par plusieurs vecteurs d' :

I.1.1.1. Origine agricole

Les pesticides, les engrais (le phosphore, les nitrates) et les matières organiques (fumiers, purins) sont les principaux polluants agricoles (Figure I.1). Lorsqu'ils sont utilisés en excès, ces produits parfois toxiques et dont la rémanence dans l'eau peut varier d'un produit à un autre, vont contaminer les sols, les eaux de surface et les nappes profondes. De même, les déchets animaux fournissent de l'énergie (carbone organique) aux bactéries présentes dans l'eau, qui sera par la suite convertie en dioxyde de carbone qui peut causer la pollution atmosphérique et les pluies acides. En parallèle, les bactéries qui consomment l'oxygène se multiplient rapidement et détruisent ainsi la vie aquatique [1, 2].



Figure I.1 : Exemple de la pollution agricole.

I.1.1.2. Origine industrielle

L'industrie génère des pollutions différentes selon le secteur d'activité. Les polluants sont obtenus lors de l'extraction et la transformation des matières premières

Chapitre I : Contexte d'étude et analyse bibliographique

en produits commercialisables (Figure I.2) [1, 3]. Les principaux rejets industriels sont les [4] :

- métaux lourds (traitement de surface et métallurgie) ;
- déchets organiques (industrie agro-alimentaire, papeterie, sucrerie, brasserie,...) ;
- hydrocarbures (pétrochimie) ;
- produits azotés (industrie des engrais, explosifs, ...) ;
- matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactives).



Figure I.2 : Exemple de la pollution industrielle.

I.1.1.3. Origine domestique

Due principalement aux rejets des eaux usées qui proviennent des eaux utilisées quotidiennement pour les toilettes, douche, cuisine et détergents (riche en déchets organiques, matières fécales, urines, polluants chimiques nocifs, ...) et à la grande quantité de plastique et de papier rejetée chaque jour dans les mers et les océans dont la décomposition est durable dans le temps (Figure I.3) [5].



Figure I.3 : Exemple de la pollution domestique.

I.1.1.4. Origine naturelle

La pollution n'est pas toujours causée par l'activité de l'homme. La nature aussi via l'activité séismique des plaques tectoniques, les volcans, les cyclones et toutes autres catastrophes, engendre la présence de certaines substances comme le baryum, l'arsenic, les fluorures, le sodium, les chlorures, le mercure, le cadmium et les cyanures dans l'environnement [1]. Cette présence naturelle de ces vecteurs de pollution facilite la contamination des eaux qui se trouvent à leur voisinage (Figure I.4).



Figure I.4 : Exemple de la pollution naturelle.

I.1.1.5. Origine associée au traitement de l'eau

Le traitement intensifié des eaux potables par le chlore et le sulfate d'alumine peut générer une pollution secondaire à travers l'apparition de sous-produits comme le chlore et l'aluminium. Le chlore, en présence de matières organiques, entraîne la formation de plusieurs sous-produits cancérigènes comme les trihalométhanes (THM) tandis que l'aluminium, attaque les neurones et génère ainsi les maladies d'Alzheimer.

I.1.2. Types de pollution de l'eau

I.1.2.1. Pollution chimique

La pollution chimique de l'eau est due à l'existence de certaines substances chimiques qui peuvent être de nature [6] :

- **Minérale** : l'eau permet la dissolution de plusieurs composés. La corrosion des métaux, la dissolution des acides, des bases et des sels sont des phénomènes qui donnent lieu à des eaux de rejets caractérisées par leurs température, pH, concentrations en métaux lourds et sels (nitrates, chlorures, ...) ;

- **Organique** : la matière organique est issue principalement de la décomposition des végétaux, des animaux et des microorganismes. Elle influe sur plusieurs paramètres à savoir : la couleur, l'odeur, la saveur, etc.

I.1.2.2. Pollution physique

La pollution physique représente les éléments solides entraînés par l'eau et qui sont subdivisés selon leur nature et leur dimension en éléments grossiers, sables et matières en suspension. Cette pollution se traduit par un trouble ou une coloration plus ou moins visible [7].

I.1.2.3. Pollution biologique

Elle est due à l'existence de micro-organismes dangereux pour la santé humaine. Parmi ces micro-organismes pathogènes, on trouve les virus, les parasites, les bactéries et les champignons [4, 7].

I.1.3. Impact de la pollution

I.1.3.1. Sur la santé humaine

Des maladies provenant de l'eau polluée tuent encore des millions de personnes chaque année. Ces maladies sont provoquées soit par la consommation de l'eau polluée soit suite à un contact cutané. A partir d'une certaine dose, les substances polluantes ont un effet toxique sur les êtres vivants (toxicité aiguë, toxicité chronique). Lorsqu'elles pénètrent dans l'organisme elles sont néfastes à sa survie et sa santé. A titre d'exemple, la présence de certains métaux tels que le nickel et le chrome provoque des troubles respiratoires, digestifs et nerveux. De même, les pesticides aussi ont des effets reprotoxiques (malformation, stérilité, etc.), mutagènes et cancérigènes [8].

I.1.3.2. Sur l'environnement

Même à faibles doses, les substances polluantes perturbent la photosynthèse et la respiration des poissons. En effet, la pollution organique engendre l'asphyxie du milieu par consommation de l'oxygène dissous et par conséquent, la mort immédiate de toute vie aquatique. Cependant, il y a aussi l'eutrophisation qui représente un déséquilibre des milieux aquatiques provoqué par l'augmentation de la concentration d'azote et de phosphore. Elle est caractérisée par une croissance excessive des plantes et des algues due à la forte disponibilité des nutriments, chose qui engendre leur colmatage [8].

I.2. Eaux de surface, qualité et traitement

Le traitement des eaux de surface, constituées par les eaux des ruisseaux, rivières, fleuves, lacs, barrage-réservoirs et glaciers, a comme principal objectif la protection de l'environnement et de la santé publique en limitant l'exposition d'une population à des micro-organismes pathogènes ou à des contaminants chimiques néfastes. Avant de donner un aperçu sur les différents procédés utilisés au cours des traitements des eaux destinées à la consommation, nous allons énumérer les principaux descripteurs qui définissent la qualité d'une eau et qui permettent d'adapter le traitement approprié. Vue leur importance, ces paramètres sont déterminés avant et après traitement.

I.2.1. Descripteurs de la qualité de l'eau

I.2.1.1. Température

La température est un facteur écologique important qu'on doit connaître avec précision. Elle a un rôle dans la solubilité des sels et des gaz. Elle affecte les propriétés de l'eau telle que la densité et la viscosité. En plus elle agit sur la nitrification et la dénitrification biologique. La nitrification est optimale pour des températures variant entre 28 à 32°C par contre, elle est fortement diminuée pour des températures de 12 à 15°C et elle s'annule pour des températures inférieures à 5°C [2, 3].

I.2.1.2. Couleur

C'est un paramètre lié à la turbidité et à la transparence d'une eau. Elle est due à la présence des substances organiques dissoutes dans l'eau ou à la présence des métaux : couleur « rouille » due au fer et « noire » due au manganèse. Il est important de dire qu'une eau présentant une couleur claire, n'est pas forcément potable [9].

I.2.1.3. pH

Le potentiel d'Hydrogène mesure la concentration en ions H_3O^+ de l'eau, il détermine son caractère acide, basique ou neutre. Des valeurs de pH inférieures à 6 ou supérieures à 9 peuvent influencer la mobilité des ions des métaux et donc sur leur toxicité. Le pH a un rôle important dans l'épuration d'un effluent et le développement bactérien. De plus, la nitrification optimale se fait à des valeurs de pH comprises entre 7,5 et 9 [2, 3].

I.2.1.4. Matières En Suspension (MES)

Les matières en suspension correspondent aux particules véhiculées par l'eau. Le diamètre moyen d'une particule est de l'ordre de 30 à 50 μm . Ces matières sont constituées de particules organiques ou minérales non dissoutes provenant de la pollution et elles constituent un paramètre important pour déterminer le degré de pollution [1, 3]. On peut classer les MES selon leur taille en [1, 2] :

- matières démontables qui se séparent naturellement sans apport des réactifs quand l'eau est au repos ;
- matières colloïdales trop fines peu décantées par gravité, mais éliminables par coagulation.

I.2.1.5. Conductivité

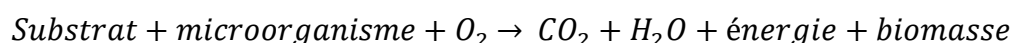
La conductivité est la propriété que possède une eau à favoriser le passage d'un courant électrique. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. Sa mesure permet donc d'évaluer la quantité de sels dissouts dans l'eau. C'est une propriété proportionnelle à la température de l'eau [2, 3].

I.2.1.6. Turbidité

Elle est inversement proportionnelle à la transparence de l'eau et se définit comme l'expression de la propriété optique qui fait que la lumière est dispersée et absorbée plutôt que transmise en ligne droite à travers l'échantillon. Cette dispersion est provoquée par l'interaction des particules en suspension présentes dans l'eau [2, 3].

I.2.1.7. Demande Biochimique en Oxygène à cinq jours (DB05)

La demande biochimique en oxygène à cinq jours, est la quantité d'oxygène nécessaire pour une oxydation biologique de la matière organique biodégradable d'un échantillon, à une température de 20 °C, selon la réaction chimique suivante [2, 5] :



I.2.1.8. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation totale de la matière organique biodégradable par voie chimique. Elle est

exprimée en mg d'O₂/L. Il s'agit de l'un des paramètres spécifiques que l'on a utilisé pour déterminer la concentration des pollutions [3, 5].

I.2.1.9. Carbone Organique Total (COT)

Le carbone organique total correspond à une mesure globale de la matière organique, particulaire et dissoute, présente dans l'eau. La mesure du COT commence par l'aération de l'eau pour éliminer le CO₂ dissout, puis une acidification pour déplacer les formes carboniques et enfin une minéralisation par oxydation ou par combustion. La matière organique est ainsi complètement minéralisée en CO₂ que l'on peut détecter en spectrophotométrie infra-rouge [9].

I.2.2. Procédés de traitement

Les eaux de surface peuvent être traitées par plusieurs procédés afin d'obtenir une eau prête à la consommation.

I.2.2.1. Pré-chloration

Ce procédé est utilisé quand l'eau est chargée en matière organique. Il permet la décomposition de ces matières pour faciliter les étapes ultérieures de traitement [10]. La pré-chloration vise à [10] :

- éliminer les goûts, les odeurs ;
- oxyder les composés minéraux (fer, manganèse, ammoniacque) et la matière organique ;
- inhiber la croissance algale dans les ouvrages de clarification (bassins de décantation et de filtration).

I.2.2.2. Coagulation-floculation

La coagulation est un procédé de clarification qui permet la déstabilisation des particules colloïdales, qui ont une vitesse de sédimentation extrêmement faible, par addition d'un réactif chimique, le coagulant. La floculation, quant à elle, est l'agglomération de ces particules « déchargées » en micro-flocs, puis en flocon volumineux et décantable, le floc. Les flocons formés adsorbent et prennent au piège les matières colloïdales en suspension et les décantent en laissant un surnageant clarifié [1, 3, 11].

I.2.2.3. Décantation

La décantation est un traitement essentiel pour l'obtention d'une eau de bonne qualité. Elle a pour but d'éliminer les particules en suspension dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Les floccs, issue généralement de la coagulation et floculation, s'accumulent au fond du bassin de décantation d'où ils sont extrait périodiquement. L'eau clarifiée, située près de la surface, est dirigée vers l'unité de filtration (Figure I.5) [2, 11].



Figure I.5 : Bassin de décantation.

I.2.2.4. Filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide qui contient des matières en suspension (MES) en le faisant passer à travers un milieu poreux constitué d'un matériau granulaire. La rétention de ces particules, présentes à l'origine dans l'eau brute ou issues de la floculation, se déroule à la surface des grains grâce à des forces physiques (Figure I.6) [2, 11].



Figure I.6 : Bassins de filtration.

I.2.2.5. Désinfection

La désinfection est un traitement qui permet de détruire ou d'éliminer les micro-organismes pathogènes : bactéries, virus et parasites ainsi que la majorité des germes banals moins résistants. En eau potable, elle est assurée par des oxydants chimiques tels que le Cl_2 , le ClO_2 et l' O_3 . C'est le moyen de fournir une eau bactériologiquement potable, tout en y maintenant un pouvoir désinfectant suffisamment élevé pour éviter les reviviscences bactériennes dans les réseaux de distribution [11].

Dans cette série de traitement, c'est à la coagulation-floculation qu'est consacré ce travail de recherche, parce qu'elle constitue une étape délicate, mais surtout que son efficacité est variable selon les zones et les conditions de mise en œuvre.

I.3. Clarification des eaux par coagulation-floculation

En traitement des eaux, la coagulation et la floculation sont des traitements qui visent à optimiser l'élimination des particules en suspension par les procédés de décantation et de filtration. Ces traitements favorisent l'agrégation des particules colloïdales, caractérisées par leur diamètre très faible (de 1nm à 1 μm) et leur charge électro-négative qui engendre des forces de répulsions, en larges et denses agrégats. Ils se déroulent en deux étapes principales à savoir la déstabilisation des particules et la collision des particules déstabilisées pour former des agrégats volumineux [11, 12].

La déstabilisation est le procédé par lequel les particules stables en suspension (colloïdes) sont modifiées de façon à leur conférer la possibilité de s'accoler entre elles. La stabilité de ces particules peut être rompue par l'ajout de réactifs chimiques appropriés qui réduisent ou éliminent les forces de répulsion (les coagulants les plus utilisés sont le sulfate d'alumine et le chlorure ferrique). Par la suite, les particules déstabilisées sont mises en contact par une agitation mécanique extérieure, les collisions favorables favorisent la formation de flocs et d'agrégats de tailles moyennes. Cependant, pour former des agrégats volumineux et facile à éliminer, il est nécessaire de rajouter à l'ensemble coagulé un flocculant qui détient des groupements réactionnels de charge inverse de celle des flocons à agglomérer. Le flocculant agit sur ces petits agrégats par adsorption et pontage afin d'augmenter leur volume et former ainsi des flocs à vitesse de sédimentation élevée [11, 12]. La Figure I.7 illustre le schéma représentatif du phénomène de coagulation-floculation.

De ce fait, il ressort de cette analyse que la coagulation et la floculation font donc appel à une agitation externe pour favoriser le mélange des phases et promouvoir les collisions. La pratique consiste à mettre en œuvre deux séquences d'agitation : une agitation rapide qui favorise le mélange des réactifs et la déstabilisation des particules, une phase d'agitation lente pour favoriser les collisions entre les particules déstabilisées et ainsi entraîner leur agrégation [12].

Par ailleurs le procédé de coagulation-floculation est aussi influencé par d'autres paramètres importants tels que : la nature et la quantité des coagulant et floculant utilisés, le pH, la température, la turbidité du milieu à traiter, la nature et la dimension des particules colloïdales à floculer, la teneur du milieu en sels minéraux, etc.

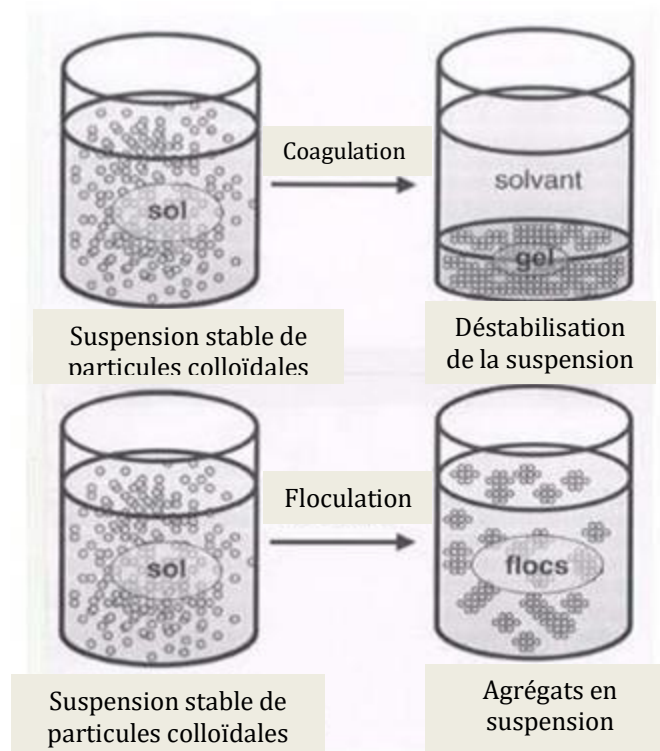


Figure I.7: Schéma représentatif du phénomène de coagulation-floculation [12].

I.4. Synthèse des travaux antérieurs réalisés sur la coagulation-floculation

Comme tout autre procédé de traitement, la coagulation-floculation a fait objet de plusieurs travaux de recherche. Ainsi, Khelili et al. [13] ont fait une étude sur l'amélioration de l'élimination des composés organiques : le phloroglucinol et l'acide pyromellitique, tout en variant les paramètres opératoires tels que le pH, la dose du sulfate d'aluminium utilisé comme coagulant, la dose et la nature du charbon actif

Chapitre II : Contexte d'étude et analyse bibliographique

utilisé comme adsorbant et floculant au même temps. Les résultats de cette étude ont montré une différence dans le taux d'élimination des composés qui est due principalement à leur structure. Au fait, l'acide pyromellitique qui contient plus de groupements acides que le phloroglucinol est beaucoup mieux éliminé. Concernant l'efficacité du charbon actif, il s'est avéré que le CAP est plus efficace que le CAG, cela a été expliqué par la nature des interactions entre le composé organique floculé et les sites actifs ainsi que la surface spécifique développée. D'autre part, la gamme optimale d'élimination du phloroglucinol est entre 4 et 7 pour le CAP et entre 6 et 7 pour le CAG, par contre le pH optimal pour l'acide pyromellitique est de 5 à 8 pour les deux types du charbon actif.

Une autre étude a été faite par Hecini et al. [14] pour voir le comportement d'autres molécules organiques, phénol et pyrogallol, en absence et en présence des sels minéraux. Les résultats obtenus confirment que les molécules contenant au moins deux fonctions acides comme le pyrogallol sont mieux éliminées en le comparant aux molécules ayant un groupe fonctionnel ou aucun comme le phénol. Par conséquent, l'ajout des sels minéraux : calcium et magnésium, fait augmenter le rendement d'élimination de ces composés organiques et surtout phénoliques.

Dans le même contexte, Rezeg et al. [15] ont étudié l'efficacité du procédé de coagulation-floculation sur l'élimination des acides aromatiques hydroxylés et carboxylés. A l'ajout de doses croissantes du SA, il s'est avéré que les composés aromatiques ayant une seule fonction acide ou deux fonctions en position méta ou para, tel que le phloroglucinol sont moins éliminés que les composés possédant deux fois deux groupements acides en contiguës, tels que l'acide gallique et le pyrogallol. Au cours de l'ajustement du pH, ils ont conclu que l'élimination du phloroglucinol est meilleure dans les pH acides alors que l'acide gallique et le pyrogallol sont mieux éliminés dans des pH neutres.

Ayeche et al. [16] se sont intéressés au traitement des eaux usées par coagulation-floculation en utilisant la chaux et le sulfate d'alumine comme coagulant. Dans leur étude, ils ont pu démontrer que la chaux est plus efficace que le sulfate d'alumine (SA) dans l'élimination des matières en suspension (MES), la charge organique ainsi que les éléments phosphorée et azotée. Cependant, la baisse de la valeur de pH enregistrée, lors de l'ajout de quantités croissantes du SA, a été attribué à la

Chapitre III : Contexte d'étude et analyse bibliographique

libération des ions H^+ par réaction d'hydrolyse. La plage optimal du pH, pour laquelle la coagulation aura lieu rapidement dépend non seulement du coagulant, mais de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter aussi.

De même, une autre recherche a été élaborée par Khalil et al. [17] dans le but de comparer entre la chaux, le chlorure ferrique, le sulfate ferrique et le sulfate d'aluminium dans l'élimination des éléments métalliques, la couleur, la turbidité, le volume de boues produits et des lixiviats de décharge. La comparaison faite sur les quatre coagulants a montré que le chlorure ferrique produit le moins de boues, la chaux est la plus efficace dans l'élimination de la turbidité mais produit le maximum de boues. Quant au sulfate d'aluminium, il s'est avéré qu'il produit moins de boues que la chaux et élimine mieux la turbidité que le chlorure ferrique et le sulfate ferrique. Par ailleurs, le lixiviat présente une grande teneur en métaux tels que le Fe, Zn et du Cd et une quantité très faible en As, Cu, Pb et Sb. Au final de cette étude, les résultats ont révélé une variation d'un coagulant à un autre et que chacun d'eux élimine certains métaux selon ses propriétés qui lui offrent la possibilité de se lier avec eux.

Labguiri et al. [18], quant à eux, ils ont optimisé le procédé de coagulation-floculation par les plans d'expériences pour voir l'effet du pH_f (pH étudié comme facteur), de la dose du coagulant et du flocculant sur le pH_r (pH étudié comme réponse) et le rendement du traitement. Les modèles élaborés ont traduit l'effet sur le pH_r : le pH_f a une interaction dominante dans le sens positif, la dose du coagulant a un effet dominant dans le sens négatif alors que la dose du flocculant et les interactions doubles et triples ont des effets très faibles. Pour le rendement, l'effet du facteur pH_f est le majoritaire dans le sens négatif, puis l'effet combiné des facteurs coagulant et flocculant dans le sens positif, tandis que leurs effets linéaires sont beaucoup plus faibles.

D'autre part, Majdy et al. [19] ont fait une étude sur l'élimination des matières en suspension des rejets des eaux usées d'une ville Marocaine, en utilisant le chlorure ferrique ($FeCl_3$) comme coagulant. Les essais de jar-test ont prouvé la capacité du procédé de coagulation-floculation d'éliminer les matières en suspension et de réduire le pH et la turbidité des eaux usées. Cependant, la conductivité a augmenté à cause des ions chlorure provenant du $FeCl_3$. La vitesse de décantation a été déterminée grâce à la courbe de Kynch, trois phases ont été obtenues. La première phase est l'agglomération des MES qui se caractérise par une vitesse faible, la deuxième partie caractérisée par une

vitesse plus grande due à la chute de agrégats volumineux. La dernière phase, quant à elle, caractérisée par une vitesse qui diminue car les gros éléments se sont décantés.

Références bibliographiques

- [1] Z. Bakiri, Traitement des eaux usées par des procédés biologiques classiques : expérimentation et modélisation, Mémoire de Magister, Université de Sétif, Algérie, 2007.
- [2] M. S. Metahri, Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou, Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2012.
- [3] L. Bouazza, Effet de la coagulation-floculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain El Houtz, Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [4] C. Picard, Transfert de matière dans un biofilm aéré sur membrane, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2011.
- [5] M. Oubadi, Etude de performance d'un procédé d'épuration OXYLAG. Cas du lagunage de la ville de Mekmen Ben Ammar wilaya de Naama, Mémoire de Magister, Université d'Oran, Algérie, 2012.
- [6] CEDRE, TRANSPORTS CANADA, Mieux comprendre les pollutions chimiques maritimes. Dossiers pédagogique. Brest : Edition CEDRE, 2012.
- [7] S. Baumont, J.P. Camard, A. Lefranc, A. Franconie, Réutilisation des eaux usées : risques sanitaires et faisabilité en Ile-de-France, Rapport ORS, 2004.
- [8] F. Gendreau, P. Gubry, J. Véron, Populations et environnement dans les pays du Sud, KARTHALA6CEPED, 303p, 1996.
- [9] E. Jestin, La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires, Agence de l'Eau Seine-Normande, France, 2005.

Chapitre II : Contexte d'étude et analyse bibliographique

[10] Notice générale d'exploitation 3E Chloration, Station de traitement KOUDIAT ACERDOUNE, Algérie, 2010.

[11] C. Cardot, Les traitements de l'eau, Edition ELLIPSES, 303p, 2013.

[12] M.D. DIHANG, Mécanismes de coagulation et de floculation de suspensions d'argiles diluées rencontrées en traitement des eaux, Thèse de Doctorat, Université PAUL SABATIER, Toulouse, France, 2007.

[13] H. Khelili, S. Achour, A. Rezeg, Efficacité du sulfate d'aluminium et du charbon actif face à des polluants organiques aromatiques, Larhyss Journal, 9, pp.99-110, 2010,

[14] L. Hecini, S. Achour, Coagulation-floculation au sulfate d'aluminium de composés organiques phénoliques et effet de sels de calcium et de magnésium, Revue des sciences de l'eau, 27(3), pp.271-280, 2014.

[15] A. Rezeg, S. Achour, Elimination d'acides organiques aromatiques par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium, Larhyss Journal, 4, pp.141-152, 2005.

[16] R. Ayeche, A. Balaska, Caractérisation et traitement par coagulation-floculation d'un effluent de laiterie, Journal de la Société Algérienne de Chimie, 20(2), pp.83-93, 2010.

[17] F. Khalil, O. Bouaouine, H. Chtioui, S. Souabi, M.A. Aboulhassan, A. Ouammou, Traitement des lixiviats de décharge par coagulation-floculation, , Journal of Materials and Environmental Science, 6(5), pp.1337-1342, 2015.

[18] W. Labgui, N. Dennai, A. Loudini, A. Belhouari, M. Chlaida, Optimisation de la coagulation floculation au niveau de la station d'épuration de Lesieur-Cristala (Casablanca, Maroc), Gestion Environnementale des Produits Chimiques, 2, pp.83-92, 2010.

[19] I. Majdy, E. Cherkaoui, A. Nounah, M. Khamar, Le traitement physico-chimique par coagulation-floculation des rejets des eaux usées de la ville de Salé, Journal of Materials and Environmental Science, 6(3), pp.834-839, 2015.

Chapitre II

Plans d'expériences

L'expérimentation est le moyen le plus privilégié pour répondre aux questions posées dans tous les domaines de la vie dans le but d'améliorer les produits et les processus étudiés. Néanmoins, les stratégies couramment utilisées pour mener ces expériences sont souvent coûteuses et peu performantes et elles conduisent à un nombre d'essais très élevé. Au fait, il faut fixer le niveau de toutes les variables sauf une et de mesurer, par la suite, la réponse objective en fonction de l'évolution de la variable non fixée. Ainsi, si plusieurs paramètres doivent être étudiés, il est donc nécessaire de répéter cette technique pour chacun d'eux, chose qui présente un travail gigantesque et souvent irréalisable. Pour pallier ce problème, il est recommandé alors d'utiliser les plans d'expériences, une stratégie qui permet de choisir judicieusement les essais à réaliser pour répondre aux questions posées avec un maximum de précision [1].

II.1. Définition d'un plan d'expériences

Un plan d'expériences est une stratégie optimale permettant d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Cette stratégie permet de fournir le meilleur protocole expérimental et de prédire, avec le maximum de précision, une réponse à partir d'un nombre minimal d'essais.

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherche à déterminer et à établir un lien qui existe entre une grandeur d'intérêt y et des variables x_i qui peuvent modifier la valeur de y via la fonction [2-5] :

$$y = f(x_i)$$

Avec :

y : réponse du système ;

x_i : facteurs ou variables d'entrée du système qui peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, continus ou discontinus.

II.2. Principe des plans d'expériences

L'utilisation des plans d'expériences dans des systèmes simples ou complexes permet d'éclaircir et de comprendre le fonctionnement de ces derniers en les simulant à une « *boite noire* » (Figure II.1). Le principe de la boite noire consiste à imposer aux

facteurs d'entrées des variations particulières, à mesurer les variations induites des réponses et à en déduire les relations entre facteurs et réponses sans avoir une connaissance maximale du phénomène étudié [6].

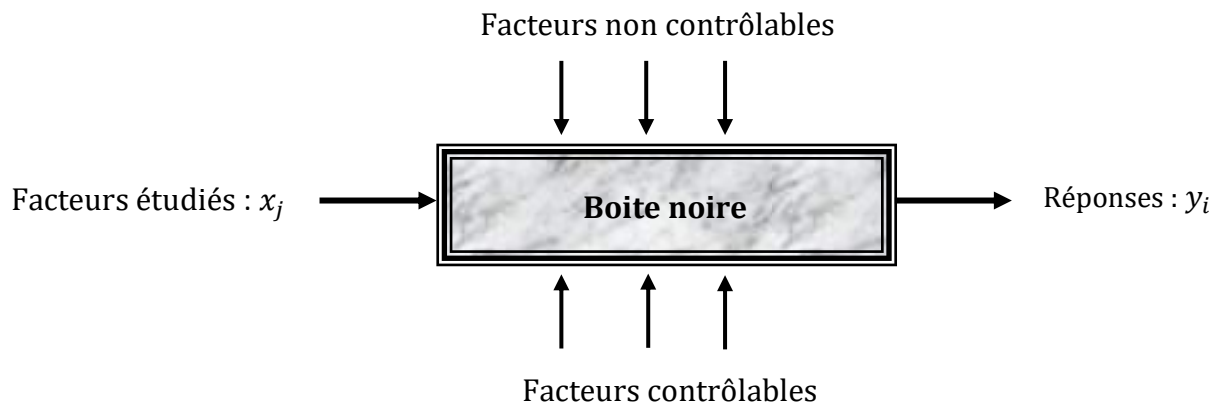


Figure II.1 : Schéma représentatif du contexte de la boîte noire et du principe des plans d'expériences [7].

Ce principe suivi permettra, d'une part, de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés et d'autres part, de détecter les interactions entre les facteurs et de déterminer leur réglage dit optimal par rapport à la réponse prédite (modèle mathématique choisi pour l'étude du phénomène).

II.3. Avantages des plans d'expériences

La méthode des plans d'expérience, définie par le principe « *tous les facteurs à chaque moment* », présente un outil sûr et pratique qui permet de conduire avec efficacité une étude où de nombreux paramètres interviennent. Ses principaux avantages sont [8, 9] :

- diminution du nombre d'essais ;
- possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs ;
- détection des interactions entre les facteurs ;
- meilleure précision sur les résultats ;
- modélisation mathématique des réponses ;
- optimisation des résultats.

II.4. Types des plans d'expériences

Dans le but de répondre à des préoccupations liées à la recherche de modèles explicatifs des cas d'étude que peut rencontrer un expérimentateur, différents types de plans sont mis en œuvre. Les plus utilisés sont [5, 10] :

- Plans factoriels complets à deux niveaux (2^k) : consiste à faire les expériences entre deux niveaux, le niveau minimal et maximal, où k est le nombre de facteurs étudiés.
- Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux (2^{k-q}) : permet de réduire le nombre d'essais à effectuer et ne faire dans l'expérimentation qu'une fraction des essais du plan complet.
- plans pour surface de réponse : permet de mesurer les réponses, qui seront très proche aux valeurs obtenus lors de l'expérimentation, grâce à un modèle mathématique validé.
- plans de mélange : consiste à étudié les mélanges dépendants entre eux dont la somme des proportions est toujours égale à 100%.

Le choix d'un plan dépend essentiellement de la nature des questions à traiter, du degré de généralité recherché pour les conclusions et des ressources disponibles (matériel expérimental, personnel, contraintes de temps ;...). Dans notre travail, nous nous sommes intéressés au plan factoriel complet à deux niveaux.

II.5. Plans factoriels complets à deux niveaux (2^k)

Les plans factoriels complets (PFC) sont très utilisés car ils sont plus simples et plus rapides à mettre en œuvre. Ils permettent d'étudier k facteurs à raison de deux niveaux par facteur (niveau supérieur (+1) et niveau inférieur (-1)). Ils sont formés de $N= 2^k$ expériences déterminées par les différentes combinaisons possibles des niveaux minimal et maximal des k facteurs et se basent généralement sur des modèles mathématiques linéaires de premier degré [6].

Pour ces plans, il faut donc calculer M inconnues du modèle (coefficients) correspondants aux :

- k effets principaux (linéaires) ;
- $(2^k)-k-1$ interactions ;
- une constante représentant la moyenne de la réponse.

Chapitre III : Plans d'expériences

Pour un plan factoriel complet à 3 facteurs, dont il faut réaliser un nombre d'expériences : $N = 2^3 = 8$, les points expérimentaux seront aux sommets d'un cube (Figure II-2) et la matrice représentative des expériences sera un tableau traduisant l'emplacement de ces points en indiquant leurs trois coordonnées en variables centrées réduites (Tableau II.1) [6, 11].

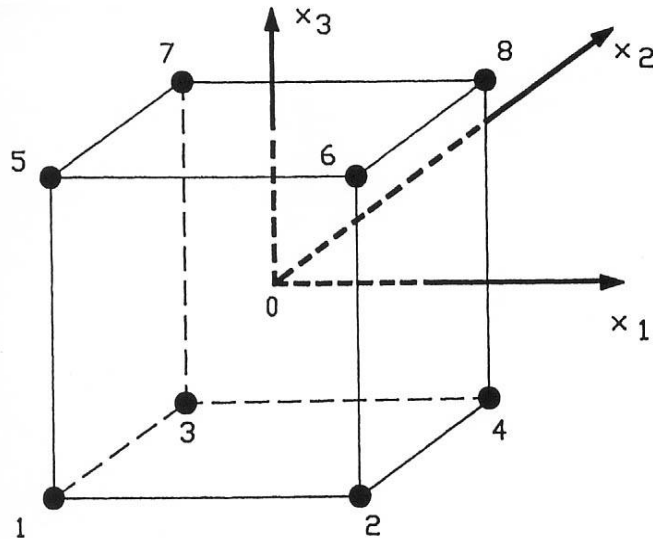


Figure II-2 : Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^3 [2].

Tableau II.1 : Matrice des expériences (N, k).

Nombre d'essai N	Valeurs des variables réelles			Valeurs des variables codées			Réponse
	Z_1	Z_2	Z_3	x_1	x_2	x_3	y_i
1	$Z_{1\min}$	$Z_{2\min}$	$Z_{3\min}$	-1	-1	-1	y_1
2	$Z_{1\max}$	$Z_{2\min}$	$Z_{3\min}$	+1	-1	-1	y_2
3	$Z_{1\min}$	$Z_{2\max}$	$Z_{3\min}$	-1	+1	-1	y_3
4	$Z_{1\max}$	$Z_{2\max}$	$Z_{3\min}$	+1	+1	-1	y_4
5	$Z_{1\min}$	$Z_{2\min}$	$Z_{3\max}$	-1	-1	+1	y_5
6	$Z_{1\max}$	$Z_{2\min}$	$Z_{3\max}$	+1	-1	+1	y_6
7	$Z_{1\min}$	$Z_{2\max}$	$Z_{3\max}$	-1	+1	+1	y_7
8	$Z_{1\max}$	$Z_{2\max}$	$Z_{3\max}$	+1	+1	+1	y_8

L'établissement de la matrice d'expérience (Tableau II.1), et par la suite, du modèle exprimant la réponse en fonction des facteurs étudiés, nécessite la transformation des valeurs d'origine/réelles (z_1, z_2, \dots, z_k) de ces derniers en variables codées ou variables centrées réduites (x_1, x_2, \dots, x_k). La formule permettant ce passage est donnée par l'équation suivante [7] :

$$x_j = \left(\frac{z_j - z_j^0}{\Delta z_j} \right), j = 1, 2, \dots, k \quad (\text{Eq. II} - 1)$$

Où :

$$z_j^0 = \frac{z_{jmax} - z_{jmin}}{2} \quad \text{et} \quad \Delta z_j = \frac{z_{jmax} - z_{jmin}}{2}$$

Avec :

z_j^0 : variable réelle correspondante au centre du domaine d'étude ;

Δz_j^0 : unité de variation suivant l'axe z_j ;

z_{jmax} et z_{jmin} : valeurs maximale et minimale de la variable réelle respectivement.

II.5.1. Modèle mathématique associé aux plans factoriels complets

Les plans factoriels complets à deux niveaux peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes. Les modèles mathématiques qui leurs sont associés sont généralement des modèles polynomiaux synergiques, de premier degré qui regroupent tous les facteurs étudiés et s'écrivent sous la forme suivante [12] :

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ j \neq u}}^k a_{ju} x_j x_u + \sum_{\substack{l,u,j=1 \\ j \neq u \neq l}}^k a_{jul\dots k} x_j x_u x_l \dots x_k \quad (\text{Eq. II} - 2)$$

Ou :

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_k x_k + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + \dots + a_{1\dots k} x_1 \dots x_k \quad (\text{Eq. II} - 3)$$

Avec :

\hat{y} : réponse calculée à partir du modèle mathématique adopté ;

x_j : variables codées (variables centrées réduites) ;

$a_0, a_j, a_{ju}, a_{jul\dots k}$: coefficients du modèle mathématique adopté :

a_0 : terme constant ou moyenne ;

a_j : effets linéaires ;

$a_{ju}, a_{jul\dots k}$: effets d'interactions.

Selon le nombre de facteurs k étudiés, le polynôme (Eq. II-3) peut s'écrire de manière, plus au moins compliquée. Il doit contenir essentiellement 2^k coefficients qui sont les inconnues (M) et refléter plus clairement l'effet de chaque facteur en absolu (seul) et en interactions doubles, triples et en interactions plus élevées si elles existent. L'ensemble des résultats d'un plan factoriel complet à deux niveaux 2^k conduit donc à un système de $N = 2^k$ équations à $M = 2^k$ inconnues, avec $N=M$.

II.5.2. Calcul des coefficients du modèle

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme de premier degré (Eq. II-3) dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$Y = X \cdot B \quad (\text{Eq. II} - 4)$$

Avec :

Y : vecteur des réponses ;

X : matrice des effets, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan du modèle postulé ;

B : vecteur des coefficients du modèle.

Cette écriture matricielle facilite ainsi le calcul des coefficients des effets linéaires et d'interactions du modèle polynomial élaboré par un programme de régression multilinéaire utilisant le critère des moindres carrés. Les ordres de grandeur de ces coefficients sont donnés par la relation suivante [8] :

$$B = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (\text{Eq. II} - 5)$$

Où :

X^t : matrice transposée de X ;

$(X^t X)$: matrice d'information ;

$(X^t X)^{-1}$: matrice de dispersion.

II.6. Analyse statistique

Une fois l'équation de régression est obtenue, nous procédons à l'analyse statistique des résultats afin de pouvoir la valider et l'exploiter par la suite.

II.6. 1. Vérification de la signification des coefficients

➤ **Cas où chaque essai est répété m fois**

Nous déterminons la moyenne des résultats des essais parallèles \bar{y}_i [7, 8, 13]:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{u=1}^m y_{iu}}{m} \quad (\text{Eq. II - 6})$$

Puis la variance de sondage S_i^2 :

$$S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2}{m - 1}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{Eq. II - 7})$$

Avec :

m : nombre de répétitions pour chaque essai ;

N : nombre d'expériences ;

y_i : réponses expérimentales.

Si les variances de sondage sont homogènes, nous calculons alors la variance de reproductibilité [7, 8, 13]:

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} \quad (\text{Eq. II - 8})$$

➤ **Cas où l'essai au centre est répété n_0 fois**

Dans ce cas, la variance des mesures est estimée par celle calculée au centre du domaine expérimental [7, 8, 13]:

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_i - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1} \quad (\text{Eq. II - 9})$$

Avec :

$n_0 - 1$: nombre de degrés de liberté ;

n_0 : nombre de répétition au centre du domaine d'étude ;

\bar{y}_0 : moyenne arithmétique des mesures effectuées au centre du domaine, elle est calculée par :

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} y_i}{n_0} \quad (\text{Eq. II} - 10)$$

Dans les deux cas, la variance de reproductibilité est indispensable pour estimer la signification des coefficients de l'équation de régression par le test de Student. Un coefficient est dit significatif s'il est pour un risque donné significativement différent de zéro. Nous testerons donc l'hypothèse [7, 8, 13]:

$$H_0 = (b_j = 0)$$

Contre l'hypothèse : $H_1 = (b_j \neq 0)$

Pour ce faire, nous calculons le rapport :

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}} \quad (\text{Eq. II} - 11)$$

Avec :

t_j : suit une loi de Student ;

b_j : j^{ème} coefficient de l'équation de régression ;

S_{b_j} : écart quadratique moyen qui est défini dans le cas d'un modèle du premier degré par :

$$S_{b_j} = \frac{S_{rep}}{\sqrt{N}} \quad (\text{Eq. II} - 12)$$

Pour un niveau de signification α et un nombre de degré de liberté $f (n_0-1)$, la table de Student (**ANNEXE I**), permet d'accéder à la valeur de $t_\alpha (f = n_0-1)$. Ainsi, si t_j calculé est plus grand que la valeur tabulée $t_\alpha(f)$, le coefficient b_j correspondant est significativement différent de zéro. De ce fait, les coefficients non significatifs sont exclus de l'équation de régression [7, 8, 13].

II.6.2. Validation du modèle

Avant d'accepter le modèle postulé, nous devons vérifier l'absence de biais, le modèle doit décrire correctement les variations de la réponse en fonction des facteurs étudiés.

➤ Recherche de biais du modèle

Le test de Fisher-Snedecor (**ANNEXE II**) consiste à comparer la variance résiduelle à la variance de reproductibilité calculée à partir de la formule [2, 7, 14, 15]:

$$S_{rés}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - \ell} \quad (\text{Eq. II - 13})$$

Avec :

$N - \ell$: degrés de liberté ;

ℓ : nombre de coefficients significatifs ;

\hat{y}_i : réponses calculées à partir du modèle.

Si la valeur calculée du test de Fisher-Snedecor, $F = \frac{S_{rés}^2}{S_{rep}^2}$ est inférieure à la valeur $F_\alpha (f_1, f_2)$ déterminée à partir de la table de Fisher (**ANNEXE II**), pour le niveau de signification $\alpha=0,95$ et les nombres de degrés de liberté $f_1 = N - \ell$ et $f_2 = n_0 - 1$, alors le modèle est considéré sans biais, ce qui revient à dire que la part des variations de y non expliquée par le modèle est aléatoire [2, 7, 14, 15].

➤ Test de signification de la régression

Quand le modèle est sans biais, nous pouvons par la suite vérifier la signification de la régression en calculant le rapport suivant :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / (\ell - 1)}{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - \ell)} \quad (\text{Eq. II - 14})$$

Avec :

\bar{y} : moyenne arithmétique des mesures effectuées à partir de la matrice des expériences, elle est calculée par :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (\text{Eq. II - 15})$$

Si la valeur F calculée est supérieur à la valeur tabulée du test de Fisher $F_\alpha (f_1, f_2)$ (**ANNEXE II**), pour le niveau de signification $\alpha=0,95$ et les nombres de degrés de liberté $f_1 = \ell - 1$ et $f_2 = N - \ell$, dans ce cas les variables retenues pour la modélisation ont dans leur ensemble un effet significatif sur y et l'équation est adéquate [2, 7, 14, 15]:

➤ Coefficient de détermination

Le coefficient de corrélation (détermination) R^2 interprète le rapport de la variance expliquée par la régression sur la variance totale. Il est défini par :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{Eq. II} - 16)$$

Le modèle est meilleur et plus représentatif, quand le coefficient de détermination s'approche plus de 1. Cependant, une correction d'erreur est obligatoire lorsque l'échantillon est d'étendue assez faible. La formule de correction est la suivante [2, 7, 14, 15]:

$$\bar{R}^2 = R^2 - (1 - R^2) \frac{\ell - 1}{N - \ell} \quad (\text{Eq. II} - 17)$$

➤ Analyse des résidus

L'évaluation de la qualité de prévision d'un modèle peut se faire par une analyse des résidus qui consiste à porter ces derniers en fonction des réponses prédites ou en fonction d'autres grandeurs. On peut ainsi détecter s'il existe une relation entre les résidus et la grandeur portée en abscisse. On doit arriver à des diagrammes ne laissant apparaître aucune relation ou tendance entre les grandeurs étudiées [2, 7, 14, 15].

Références bibliographiques

[1] D. Amoura, Modélisation d'un réacteur à lit fixe par la méthode des plans d'expériences. Application à la cémentation du cuivre par la poudre de zinc, Mémoire de Magister, Université de Béjaia, Algérie, 2011.

[2] S. Ziani, Les plans d'expériences, Polycopié de cours, Université de Bouira, Algérie, 2019.

[3] F. Rabier, Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2007.

Chapitre III : Plans d'expériences

- [4] K. Sandrine, Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 2004.
- [5] J. Goupy, Les plans d'expériences, Revue MODULAD, Paris, 2006.
- [6] I. Yahiaoui, Les plans d'expériences initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré, Polycopié de cours, Université de Béjaia, 2015.
- [7] V. Kafarov, Méthodes cybernétiques et technologie chimique, Edition Mir, Moscou, 1974.
- [8] J. Goupy, Introduction aux plans d'expériences, Edition DUNOD, Paris, 2001.
- [9] J. Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponses, Edition DUNOD, Paris, France, 1999.
- [10] K. Kimouche, Etude de quelques plans d'expériences associées aux surfaces de réponse, Thèse de Magister, Université de Constantine, Algérie, 2008.
- [11] J. Goupy, Revue de statistique appliquée, Edition Numdam, Paris, France, 1990.
- [12] J. Faucher, Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2006.
- [13] G. Sado, M. C. Sado, Les plans d'expériences de l'expérimentation à l'assurance qualité, Edition Afnor Technique, France, 1991.
- [14] H. Simard, Outils technologiques en gestion de la qualité : trois exemples d'application des statistiques industrielles, Thèse de Magister, université de Montréal, Canada, 1996.
- [15] D. Benoit, Y. Taurbier, S. Germain, Plans d'expériences, construction et analyse, Edition Lavoisier, France, 1994.

Chapitre III

Mise en œuvre expérimentale

Dans ce chapitre, nous allons décrire le protocole expérimental établi pour le traitement des eaux brutes du barrage KOUDIAT ACERDOUNE, le mode de préparation des solutions ainsi que le dispositif expérimental adopté (jar test) pour réaliser cette étude en présence du coagulant (sulfate d'aluminium) seul puis combiné au floculant (polymère polyélectrolyte). Les différentes techniques d'analyse et de mesure utilisées pour suivre l'évolution des propriétés physicochimiques des eaux brutes et traitées par le procédé de coagulation-floculation sont aussi présentées.

III.1. Détermination des caractéristiques de l'eau brute à traiter

L'eau brute sur laquelle nous avons effectué notre étude à la station de traitement KOUDIAT ACERDOUNE a été procurée du barrage KOUDIAT ACERDOUNE, situé au niveau de l'Oued Isser de la commune de Maala, dans la wilaya de BOUIRA. Cette eau de surface récupérée, subit chaque jour quatre séries d'analyse dans le but de déterminer, non seulement, ses caractéristiques physicochimiques, mais aussi de suivre leur évolution en fonction du temps et du climat.

- **Température** : mesurée à l'aide d'une sonde de température. La température varie en fonction des conditions climatiques ;
- **pH** : mesuré à l'aide d'une électrode d'un pH mètre. La température est la caractéristique physique qui influe le plus sur le pH ;
- **Turbidité** : mesurée par un turbidimètre, elle dépend essentiellement de la quantité des matières en suspension dissoutes dans l'eau ;
- **Conductivité** : mesurée à l'aide d'un conductimètre, elle est proportionnelle à la quantité des sels minéraux dissous dans l'eau.

III.2. Procédure de traitement de l'eau brute

III.2.1. Préparation des réactifs de traitement

- **Coagulant**

Le sulfate d'alumine, de formule chimique octadécahydrate $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$; de masse molaire 666,6 g/mol, est le coagulant étudié dans ce travail de recherche (Figure III.1). Ce sel basique qui se présente sous forme de cristaux de couleur blanche est le

coagulant le plus employé en station de traitement des eaux, vu sa disponibilité, son faible coût et son efficacité.

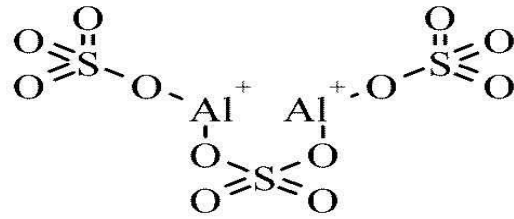
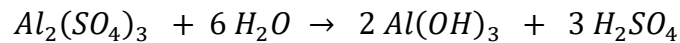
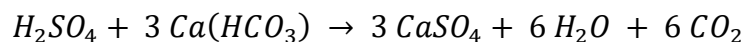


Figure III.1 : Formule développée du sulfate d'alumine (ANNEXE VI).

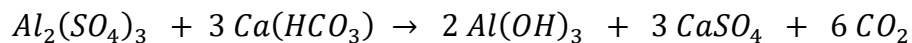
L'efficacité du sulfate d'alumine est mesurée par rapport à sa capacité de se dissocier dans l'eau en ions aluminium et sulfate. En effet, l'ion aluminium réagit sur l'eau pour former l'hydroxyde d'aluminium qui se précipite sous la forme d'un floc volumineux selon la réaction [1]:



De même, l'acide sulfurique formé au cours de cette réaction réagit avec le bicarbonate présent dans l'eau, pour donner le sulfate de calcium accompagné d'un dégagement de dioxyde de carbone selon la réaction :



Au final, l'action du sulfate d'alumine sur l'eau se résume dans l'équation globale suivante :



Les solutions de sulfate d'alumine utilisées dans les expériences de traitement ont été préparées par dilution à partir d'une solution mère de concentration égale à 16 g/L. Ses solutions filles ont été choisies selon les recommandations exigées par les normes utilisées par la station de traitement KOUDIAT ACERDOUNE et le plan d'expériences adapté pour lancer cette étude via le plan factoriel complet à deux niveaux.

- **Floculant**

Le floculant utilisé lors de cette étude, pour augmenter davantage la taille et la cohésion des floes, est de nature organique. C'est un polymère synthétique, polyélectrolyte et anionique (Figure III.2), de haut poids moléculaire, qui se présente sous forme d'une poudre de couleur blanche. La fiche technique de ce polymère est illustrée en ANNEXE VII.

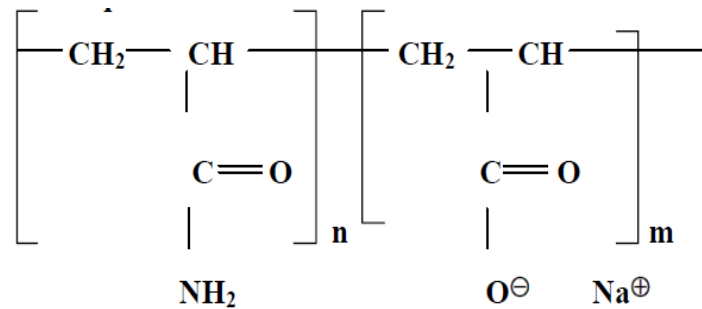


Figure III.2 : Chaîne de polymérisation du floculant anionique (ANNEXE VII).

La solution, de viscosité faible, du polymère polyélectrolyte utilisée pour la floculation est obtenue par dissolution d'une quantité de 0,1 g de ce polymère dans un volume de 100 mL d'eau distillée sous une forte agitation pendant 8 heures. La solution polymérique ainsi obtenue est ajoutée à l'eau à traiter contenant le coagulant par administration de petits volumes de 0,5 ml.

II.2.2 Description du montage

Les essais de coagulation-floculation de cette présente étude ont été réalisés dans un flocculateur de type Jar-test de marque SBS, composé d'une batterie de six béchers d'une capacité de un litre chacun, munis de pâles rectangulaires à vitesse de rotation variable (Figure III.3). Ces essais prototypes (technique standard) ont pour but de déterminer les doses optimales de coagulant et de floculant à ajouter dans l'eau brute pour sa clarification afin de les projeter, par la suite, à l'échelle de la station de traitement.

III.2.3. Protocole expérimental

Au cours de cette étude, nous avons réalisé deux séries d'expériences. Une série basée sur le traitement de l'eau brute par l'addition de coagulant seulement et une autre basée sur le traitement de l'eau brute par l'addition du coagulant et du floculant au même temps.

Pour la première série, nous avons versé, dans chacun des six béchers du jar-test, un litre d'eau brute à traiter au quel nous avons ajouté le coagulant à des concentrations bien déterminées. Une fois la manipulation est lancée, nous avons déclenché les pales d'agitation ainsi que le chronomètre afin de suivre l'évolution du traitement en fonction du temps.



Figure III.3 : Jar-test SBS.

Pour la deuxième série, la même expérience a été lancée à l'exception de l'ajout du mélange de coagulant et du floculant au même moment.

A la fin de chaque série d'expériences, les pales sont ôtées d'une manière à respecter l'état physique des floes formés, le mélange obtenu est décanté pendant 45 minutes afin de pouvoir récupérer le surnageant du bécher, qui subira ensuite plusieurs analyses.

Remarque :

Il est impérativement important de savoir que lors de la réalisation de ces tests, nous avons des phénomènes qui se passent et qui influent sur l'évolution du traitement effectué. Ses phénomènes sont :

- **Changement de température**

Les mouvements thermiques ou de convection peuvent se produire et interférer sur la décantation des particules coagulées. Ce phénomène peut être limité en maîtrisant les variations de température de l'eau au cours du test.

- **Dégazage**

Pendant la période de décantation, les floccs formés peuvent flotter à cause des gaz dissouts dans l'eau, qui sont originaires de l'agitation mécanique, de la température élevée ou de réactions chimiques.

- **Intervalle de temps entre l'échantillonnage et l'essai**

L'activité biologique et le changement de température peuvent changer les caractéristiques d'une eau. Pour cette raison le laps de temps entre le prélèvement et le test doit être réduit au minimum et doit être noté dans toutes les expériences réalisées.

III.3. Détermination des caractéristiques de l'eau traitée

Le surnageant récupéré après la décantation de l'eau brute traitée par coagulation-floculation subit, à son tour, une série d'analyse dans le but d'évaluer l'efficacité du traitement effectué. Ainsi, le paramètre d'appréciation de la qualité de cette opération étant la turbidité résiduelle du surnageant. Cette mesure est souvent complétée par la mesure du pH et la mesure de la teneur en aluminium.

III.3.1. Détermination de la teneur en aluminium

Afin de déterminer la teneur en aluminium dans l'eau traitée en fonction de la quantité du coagulant ajoutée, nous avons procédé, tout d'abord, à la préparation quotidienne des solutions suivantes :

- Solution de chlorure de calcium ($\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$), de concentration 0,023 M ;
- Solution d'acide ascorbique ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), de concentration 0,0045M ;

Chapitre III : Mise en œuvre expérimentale

- Solution tampon de pH = 4,6 ; préparée à partir d'une solution d'acétate de sodium ($C_2H_3O_2Na$) de concentration 1,71 M et une solution d'acide acétique ($C_2H_4O_2$, pureté 96%) de concentration 1,07M ;
- Solution du rouge d'alizarine ($C_{14}H_8Na_2O_4S$), de concentration $4,16 \cdot 10^{-3}$ M

Par la suite, nous avons mélangé le surnageant récupéré après chaque procédé de coagulation-floculation, à un volume de 25 mL, avec 2,5 mL de chlorure de calcium, 5 mL du tampon d'acétate, 1mL d'acide thioglycolique et 1mL du rouge d'alizarine. L'ensemble est ajusté avec l'eau distiller jusqu'au trait de jauge d'une fiole de 50 mL, puis agité avant de le laisser au repos pendant un temps allant de 90 minute à 2 heures (Figure III.4).



Figure III.4 : Solutions de mesure de la teneur en aluminium pour les différentes eaux traitées.

La teneur en aluminium présente ce mélange est analysé par mesure d'absorbance via un spectrophotomètre UV-visible de type LANGE RD 2800 à la longueur d'onde $\lambda = 490$ nm.

Références bibliographiques

[1] C. Cardot, Les traitements de l'eau, Edition ELLIPSES, 303p, 2013.

Chapitre IV
*Modélisation du procédé de
coagulation-floculation*

Ce présent chapitre illustre toutes les étapes suivies pour l'élaboration des modèles mathématiques de simulation du pH, de la turbidité et de la teneur en aluminium en fonction des différents paramètres opératoires étudiés lors du traitement des eaux brutes du barrage KOUDIAT ACERDOUNE par le procédé de coagulation-floculation.

IV.1. Plan d'expérimentation

Pour établir les équations représentatives des modèles des plans d'expériences basés sur le plan factoriel complet (PFC), il est nécessaire de définir les paramètres expérimentaux qui changent au cours des expériences. A cet effet, la concentration du coagulant (sulfate d'alumine SA), la vitesse d'agitation et le temps d'agitation varient selon les valeurs indiquées dans le **Tableau IV.1**.

Tableau IV.1 : Valeurs des paramètres opératoires à différents niveaux.

Variables réelles	Variables centrées réduites	Niveau bas	Point central	Niveau haut
		-1	0	+1
z_1 : [SA] (mg/L)	x_1	5	7,5	10
z_2 : vitesse (tr/min)	x_2	40	110	180
z_3 : temps (min)	x_3	3	9	15

IV.2. Elaboration du modèle de premier degré

Le modèle mathématique associé au plan factoriel complet à deux niveaux (2^k) est généralement un modèle polynomial synergique de premier degré qui regroupe tous les facteurs étudiés. Dans notre cas, le modèle postulé pour présenter la variation du pH, de la turbidité et de la teneur en aluminium en fonction des paramètres opératoires étudiés est un modèle à 8 coefficients qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

Avec :

\hat{y} : réponse estimée (pH, turbidité et teneur en aluminium) ;

x_1, x_2, x_3 : variables centrées réduites ;

b_0 : valeur moyenne de la réponse ;

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

b_1, b_2, b_3 : effets linéaires ;

b_{12}, b_{13}, b_{23} : effets d'interactions doubles ;

b_{123} : effet d'interaction triple.

Ainsi, les différents modèles de premier degré établis au cours de cette étude pour l'interprétation du procédé de coagulation-floculation via la mesure de pH, de turbidité et de teneur en aluminium, ont été élaborés selon le type de traitement adapté :

IV.2.1. Modèles obtenus sans ajout de floculant

La matrice d'expérience développée en se basant sur le PFC et le modèle de 1^{er} degré regroupe 8 combinaisons des trois facteurs retenus pour cette étude. Les valeurs des variables réelles et codées des différents paramètres opératoires ainsi que les réponses obtenues pour chaque essai, en absence du floculant, sont consignés dans le Tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Matrice des expériences pour l'étude du procédé sans ajout de floculant.

N° d'essai	Matrice codée			Matrice réelle			Réponses mesurées		
	x_1	x_2	x_3	z_1 (mg/L)	z_2 (tr/min)	z_3 (min)	pH	turb (NTU)	Teneur Al^{3+} (mg/L)
1	-1	-1	-1	5	40	3	6,77	4,55	0,78
2	+1	-1	-1	10	40	3	6,60	5,12	0,93
3	-1	+1	-1	5	180	3	6,91	2,2	0,76
4	+1	+1	-1	10	180	3	6,62	1,98	1,15
5	-1	-1	+1	5	40	15	6,92	1,82	0,25
6	+1	-1	+1	10	40	15	6,64	1,21	0,44
7	-1	+1	+1	5	180	15	6,92	1,61	0,52
8	+1	+1	+1	10	180	15	6,68	1,69	1,20

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

Pour nous assurer de la reproductibilité des résultats et par la suite, estimer la variance de reproductibilité, l'essai effectué au centre du domaine d'étude est répété six fois. Les valeurs des réponses pour chacun de ces essais sont rassemblées dans le Tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Valeurs du pH, de la turbidité et de la teneur en aluminium au centre du domaine d'étude en absence du floculant.

n_0	pH	$turb (NTU)$	$Teneur Al^{3+} (mg/L)$
1	6,74	3,69	0,30
2	6,82	4,07	0,43
3	6,82	3,93	0,25
4	6,83	4,01	0,40
5	6,84	3,94	0,44
6	6,84	3,25	0,36

La moyenne des six essais au centre effectués pour chacune des réponses mesurées en absence du floculant est :

- Dans le cas de pH : $\overline{pH}_0 = 6,82$;
- Dans le cas de la turbidité : $\overline{turb}_0(NTU) = 3,815$;
- Dans le cas de la teneur en aluminium : $\overline{Teneur Al^{3+}}_0(mg/L) = 0,36$.

IV.2.1.1. Calcul des coefficients des modèles

Le calcul des coefficients des effets linéaires et d'interaction des trois modèles élaborés pour l'étude des variations de pH, de turbidité et de teneur d'aluminium en absence du floculant, s'effectue via l'équation (**Eq. II – 5**) du chapitre II : $B = [X^T X]^{-1} X^T Y$. Leurs valeurs sont regroupées dans le Tableau IV.4.

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

Tableau IV.4 : Valeurs des coefficients des modèles de variation de pH, de turbidité et de teneur en aluminium en absence du floculant.

b_j	Terme constant	Effets linéaires			Effets d'interaction			
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
pH	6,76	-0,12	0,03	0,03	-0,01	-0,01	-0,02	0,02
Turb (NTU)	2,52	-0,02	-0,65	-0,94	-0,01	-0,11	0,72	0,19
Teneur Al^{3+} (mg/L)	0,75	0,18	0,15	-0,15	0,09	0,04	0,10	0,03

IV.2.2. Modèles obtenus avec ajout de floculant

De même, la matrice d'expérience développée regroupe 8 combinaisons. Les valeurs des variables réelles et codées des différents paramètres opératoires ainsi que les réponses obtenues pour chaque essai, en présence du floculant, sont consignés dans le Tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Matrice des expériences pour l'étude du procédé avec ajout de floculant.

N° d'essai	Matrice codée			Matrice réelle			Réponses mesurées		
	x_1	x_2	x_3	z_1 (mg/L)	z_2 (tr/min)	z_3 (min)	<i>pH</i>	<i>turb</i> (NTU)	<i>Teneur Al^{3+}</i> (mg/L)
1	-1	-1	-1	5	40	3	7,01	4,42	0,48
2	+1	-1	-1	10	40	3	6,67	2,62	0,65
3	-1	+1	-1	5	180	3	7,00	2,31	0,23
4	+1	+1	-1	10	180	3	6,67	2,70	0,43
5	-1	-1	+1	5	40	15	6,99	2,83	0,14
6	+1	-1	+1	10	40	15	6,66	2,07	0,18
7	-1	+1	+1	5	180	15	7,05	0,56	0,04
8	+1	+1	+1	10	180	15	6,76	3,44	0,55

Les valeurs des réponses des essais effectués au centre du domaine d'étude sont regroupées dans le Tableau IV.6.

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

Tableau IV.6 : Valeurs du pH, de la turbidité et de la teneur en aluminium au centre du domaine d'étude en présence du flocculant.

n_0	pH	$turb (NTU)$	$Teneur Al^{3+} (mg/L)$
1	6,63	1,85	0,27
2	6,63	1,50	0,19
3	6,64	1,90	0,18
4	6,66	1,74	0,16
5	6,68	1,91	0,12
6	6,68	2,09	0,25

La moyenne des six essais au centre effectués pour chacune des réponses mesurées en présence du flocculant est :

- Dans le cas de pH : $\overline{pH}_0 = 6,65$;
- Dans le cas de la turbidité : $\overline{turb}_0(NTU) = 1,83$;
- Dans le cas de la teneur en aluminium : $\overline{TeneurAl^{3+}}_0(mg/L) = 0,2$.

IV.2.2.1. Calcul des coefficients des modèles

Le calcul des coefficients des modèles élaborés en présence du flocculant se fait avec la même méthode citée ci-dessus. Les résultats de ce calcul sont rassemblés dans le Tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Valeurs des coefficients des modèles de variation de pH, de turbidité et de teneur en aluminium en présence du flocculant.

b_j	Terme constant	Effets linéaires			Effets d'interaction			
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
pH	6,85	-0,16	0,02	0,01	0,006	0,006	0,02	0,004
Turb (NTU)	2,62	0,09	-0,37	-0,39	0,73	0,44	0,14	0,18
$TeneurAl^{3+}$ (mg/L)	0,34	0,12	-0,03	-0,11	0,06	0,02	0,09	0,06

IV.3. Analyse statistique des équations de régression

IV.3.1. Vérification de la signification des coefficients

Le test de Student permet de déterminer si parmi les coefficients des modèles, il existe des coefficients non significatifs, lesquels seront éliminés de l'équation car leur influence sur la réponse mesurée est négligeable. A cet effet, il faut d'abord calculer la variance de reproductibilité et l'écart type moyen de chacun des modèles (Tableau IV.8).

Tableau IV.8 : Valeurs des variances de reproductibilité et des écarts types des modèles postulés en absence et en présence du floculant.

	Modèles sans ajout de floculant		Modèles avec ajout de floculant	
	S_{rep}^2	S_{bj}	S_{rep}^2	S_{bj}
pH	0,0014	0,0134	0,0005	0,0083
Turb (NTU)	0,0934	0,1080	0,0393	0,0701
Teneur Al^{3+} (mg/L)	0,0057	0,0267	0,0032	0,0198

Par ailleurs, nous calculons, pour chaque modèle, les t_j correspondants à chaque effet. Les résultats obtenus dans les cas d'absence et de présence du floculant sont répertoriés dans les Tableaux IV.9 et IV.10 respectivement.

Tableau IV.9 : Valeurs des t_j des modèles de variation de pH, de turbidité et de teneur en aluminium en absence du floculant.

t_j	Terme constant	Effets linéaires			Effets d'interaction			
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{123}
pH	505,43	9,16	1,87	2,43	0,75	0,56	1,12	1,50
Turb (NTU)	23,3	0,21	6,04	8,70	0,12	1,02	6,67	1,71
Teneur Al^{3+} (mg/L)	28,22	6,60	5,76	5,66	3,42	1,54	3,88	1,17

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

Tableau IV.10 : Valeurs des t_j des modèles de variation de pH, de turbidité et de teneur en aluminium en présence du floculant.

t_j	Terme constant	Effets linéaires			Effets d'interaction			
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{123}
pH	828,81	19,51	2,27	1,66	0,76	0,76	2,57	0,45
Turb (NTU)	37,38	1,27	5,23	5,62	10,40	6,30	2,02	2,59
Teneur Al^{3+} (mg/L)	17,01	5,80	1,26	5,54	3,15	1,13	4,66	2,77

Pour le niveau de signification $\alpha = 0,05$ et le nombre de degré de liberté $f = n_0 - 1 = 5$, la valeur tabulée du test de Student relative à un test bilatéral est égale à $t_{\alpha}(f) = t_{0,05}(3) = 2,57$ (Annexe I). Ainsi, pour :

- **Modèles obtenus sans ajout de floculant**

- **Pour le pH :** les valeurs calculées de t_2 , t_3 , t_4 , t_{12} , t_{13} , t_{23} et t_{123} sont inférieurs à la valeur tabulée, alors les coefficients correspondant b_2 , b_3 , b_4 , b_{12} , b_{13} , b_{23} et b_{123} ne sont pas significatifs et peuvent être éliminés de l'équation du modèle ;
- **Pour la turbidité :** les valeurs calculées de t_1 , t_{12} , t_{13} , et t_{123} sont inférieures à la valeur tabulée, alors les coefficients correspondant b_1 , b_{12} , b_{13} , et b_{123} ne sont pas significatifs et peuvent être éliminés de l'équation du modèle ;
- **Pour la teneur en aluminium :** les valeurs calculées de t_{13} et t_{123} sont inférieures à la valeur tabulée, alors les coefficients correspondant b_{13} et b_{123} ne sont pas significatifs et peuvent être éliminés de l'équation du modèle.

- **Modèles obtenus avec ajout de floculant**

- **Pour le pH :** les valeurs calculées de t_2 , t_3 , t_{12} , t_{13} , et t_{123} sont inférieures à la valeur tabulée, alors les coefficients correspondant b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} et b_{123} ne sont pas significatifs et peuvent être éliminés de l'équation du modèle ;

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

- **Pour la turbidité** : les valeurs calculées de t_1 et t_{23} sont inférieures à la valeur tabulée, alors les coefficients correspondant b_1 et b_{23} , b_{13} ne sont pas significatifs et peuvent être éliminés de l'équation du modèle ;
- **Pour la teneur en aluminium** : comme les valeurs calculées de t_2 et t_{13} sont inférieures à la valeur tabulée, alors les coefficients correspondant b_2 et b_{13} ne sont pas significatifs et peuvent être éliminés de l'équation du modèle.

IV.3.2. Vérification de la validation du modèle

a) Recherche de biais

Pour vérifier l'absence du biais, nous devons comparer la variance résiduelle ($S_{rés}^2$) à la variance de reproductibilité (S_{rep}^2) à l'aide du test de Fisher-Snedecor : $F = \frac{S_{rés}^2}{S_{rep}^2}$.

Les valeurs des variances résiduelles $S_{rés}^2$ calculées pour chaque modèle ainsi que les valeurs des Fisher correspondants sont regroupées dans le Tableau IV.11.

Tableau IV.11 : Valeurs des variances de régression, des Fisher calculées et tabulées des modèles postulés

	Modèles sans ajout de floculant			Modèles avec ajout de floculant		
	pH	Turb (NTU)	Teneur Al^{3+} (mg/L)	pH	Turb (NTU)	Teneur Al^{3+} (mg/L)
$S_{rés}^2$	0,0032	0,0939	0,0107	0,0010	0,1113	0,0045
F_{cal}	1,0067	5,19	1,88	1,85	2,84	1,44
$f_1 (N- \ell)$	6	4	2	5	2	2
$f_2 (n_0-1)$	5	5	5	5	5	5
F_{tab}	4,95	10,1	5,79	5,05	5,79	5,79

Les valeurs tabulées du test de Fisher $F_{0,95} (N- \ell, n_0 -1)$ (**Annexe II**) étant supérieures à celles calculées, alors nous pouvons conclure que tous les modèles obtenus pour le pH, la turbidité et la teneur en aluminium en absence et en présence du floculant sont tous non biaisés.

b) Test de signification de la régression

Lorsque le modèle est sans biais, nous pouvons donc vérifier la signification de la régression par le test de Fisher :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / (\ell - 1)}{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - \ell)}$$

Les valeurs des Fisher calculées et tabulées des modèles postulés sont regroupées dans le Tableau IV.12.

Dans le cas des modèles déterminés en absence du floculant, les valeurs tabulées du test de Fisher $F_{0,95}(\ell - 1, N - \ell)$ (**Annexe II**) des équations de régression représentatives du pH et de la turbidité, étant inférieures à celles calculées, alors nous pouvons conclure quelles sont adéquates et valides à 95%. Ces deux équations s'écrivent alors :

- $pH = 6,7575 - 0,1225 x_1$
- $Turb (NTU) = 2,5225 - 0,6525 x_2 - 0,94 x_3 + 0,72 x_{23}$

Tableau IV.12 : Valeurs des Fisher calculées et tabulées des modèles postulés en présence et en absence du floculant.

	Modèles sans ajout de floculant			Modèles avec ajout de floculant		
	pH	Turb (NTU)	Teneur Al^{3+} (mg/L)	pH	Turb (NTU)	Teneur Al^{3+} (mg/L)
F_{cal}	36,56	51,87	14,44	104,5 1	15,06	14,43
$f_1(\ell - 1)$	1	3	5	1	5	5
$f_2(N - \ell)$	6	4	2	6	2	2
F_{tab}	5,99	6,59	19,3	5,99	19,3	19,3

Cependant, l'équation de régression représentant la teneur en aluminium n'est pas adéquate du fait que son Fisher calculé est inférieur à celui tabulé.

Par ailleurs, en présence du floculant, les modèles représentatifs de la turbidité et de la teneur en aluminium révèlent des valeurs tabulées du test de Fisher $F_{0,95}(\ell - 1, N - \ell)$ (**Annexe II**) supérieures à celles calculées, chose qui signifie qu'ils ne

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

sont pas adéquats. Seul le modèle représentatif de pH est adéquat et valide à 95%, il s'écrit :

- $pH = 6,8513 - 0,1613 x_1 + 0,0213 x_{23}$

IV.3.3. Evaluation de la qualité des modèles

a) Evaluation par le coefficient de détermination

Pour évaluer le degré d'explication d'un modèle par rapport aux réponses mesurées, on fait appel au coefficient de corrélation R^2 . Les valeurs de R^2 obtenues pour les modèles postulés sont regroupées dans le tableau IV.13.

Tableau IV.13 : Valeurs des coefficients de détermination des modèles postulés en présence et en absence du floculant.

	Modèles sans ajout de floculant			Modèles avec ajout de floculant		
	pH	Turb (NTU)	%Al ³⁺ (mg/L)	pH	Turb (NTU)	%Al ³⁺ (mg/L)
R^2	0,859	0,975	-	0,977	-	-

Les valeurs de R^2 des trois modèles sont proches de 1. Cela signifie que les modèles sont représentatifs ce qui veut dire que les variations des réponses sont expliquées convenablement par les équations de régression représentatives.

b) Evaluation par un plan d'expérimentation

Cette évaluation se fait en comparant les réponses mesurées expérimentalement aux bornes de l'intervalle, à celles obtenues à partir du modèle prédictif via le calcul des erreurs relatives données par l'expression suivante :

$$Erreurs (\%) = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100$$

Avec :

y_i : réponse mesurée expérimentalement ;

\hat{y}_i : réponse calculée à partir du modèle.

Les résultats de la comparaison des réponses obtenues expérimentalement à celles calculées par les modèles sont consignés dans les Tableaux IV.14 et IV.15.

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

L'observation des erreurs relatives répertoriées dans ces deux tableaux, montre que l'écart maximal entre les valeurs mesurées et celles données par les modèles mathématiques prédits (\hat{y}_i) n'atteint pas 10 %, ce qui permet d'avancer que les équations de premier degré retenues pour expliquer l'évolution du pH et de la turbidité en fonction de la concentration de SA, la vitesse et le temps d'agitation, simulent très bien l'expérience que ce soit aux frontières ou au centre du domaine d'étude.

Tableau IV.14 : Valeurs des erreurs relatives aux frontières du domaine d'étude dans le cas des modèles obtenus en absence du floculant.

Modèles sans ajout de floculant						
N° d'essai	pH			Turb(NTU)		
	pH_i	\widehat{pH}_i	Erreur (%)	$Turb_i$	\widehat{Turb}_i	Erreur (%)
1	6,77	6,88	1,62	4,55	4,84	6,26
2	6,60	6,64	0,53	5,12	4,84	5,57
3	6,91	6,88	0,43	2,20	2,09	5,00
4	6,62	6,64	0,23	1,98	2,09	5,56
5	6,92	6,88	0,58	1,82	1,52	16,76
6	6,64	6,64	0,08	1,21	1,52	25,21
7	6,92	6,88	0,58	1,61	1,65	2,48
8	6,68	6,64	0,67	1,69	1,65	2,37

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

Tableau IV.15 : Valeurs des erreurs relatives aux frontières du domaine d'étude dans le cas des modèles obtenus en présence du floculant.

N° d'essai	Modèles avec ajout de floculant		
	pH		
	pH_i	\widehat{pH}_i	Erreur (%)
1	7,01	7,03	0,34
2	6,67	6,71	0,62
3	7,00	6,99	0,13
4	6,67	6,67	0,02
5	6,99	6,99	0,02
6	6,66	6,67	0,13
7	7,05	7,03	0,23
8	6,76	6,71	0,72

Analyse des résidus

L'analyse des résidus des modèles prédits de pH et de la turbidité, établis en présence et en absence du floculant, est illustrée sur les Figures IV.1, IV.2 et IV.3 respectivement. Les résidus (ε) sont calculés à partir de la relation suivante :

$$\varepsilon = y_i - \widehat{y}_i$$

Les diagrammes des Figures IV.1, IV.2 et IV.3, ne laissent apparaître aucune relation entre les valeurs prédites et les résidus (ε), car les points semblent disposés aléatoirement. Ce résultat traduit également l'absence d'informations dans les résidus ce qui nous permet d'affirmer que toutes les variations des réponses étudiées sont expliquées par les modèles de régression choisis.

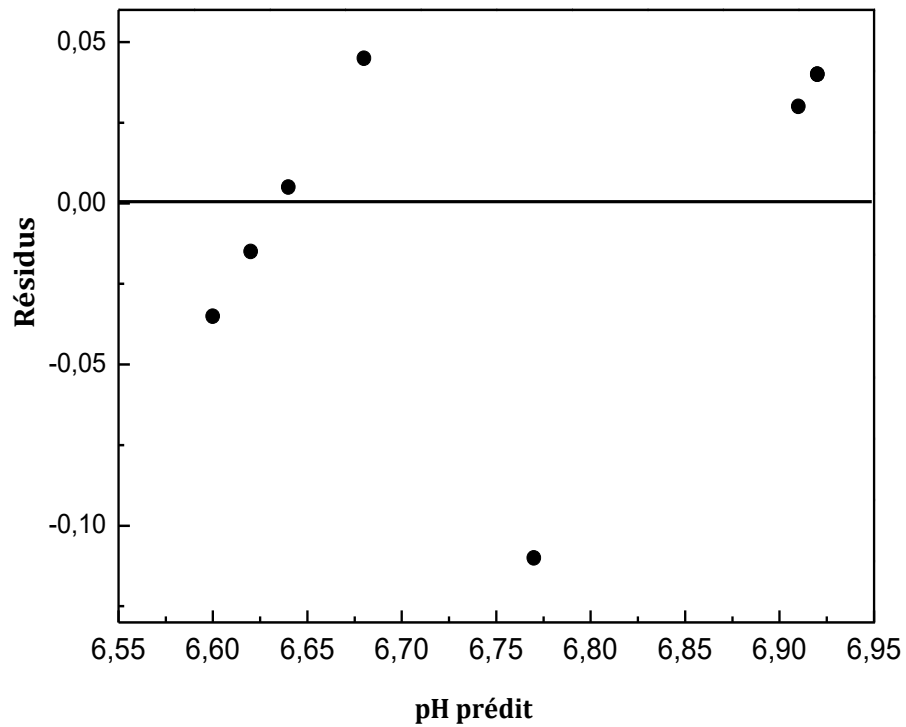


Figure IV.1 : Diagramme des résidus du modèle de pH obtenu en absence du flocculant.

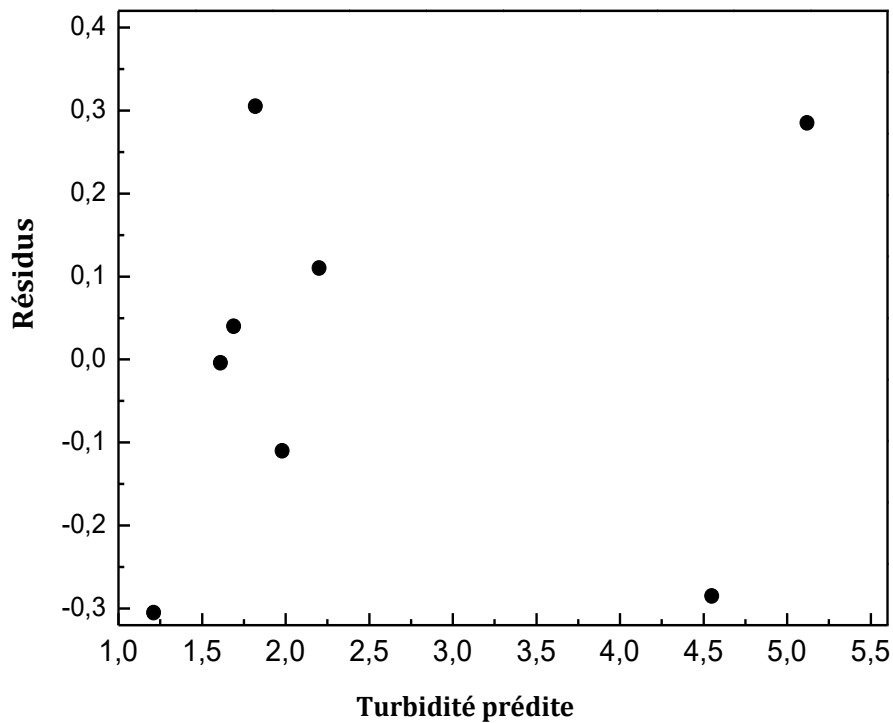


Figure IV.2 : Diagramme des résidus du modèle de la turbidité obtenu en absence du flocculant.

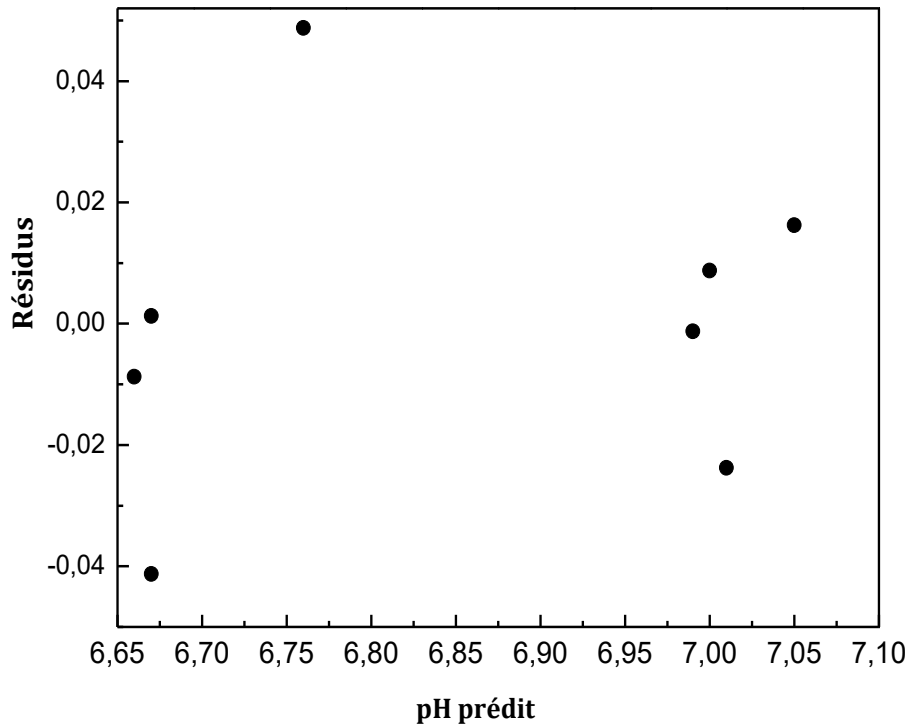


Figure IV.3 : Diagramme des résidus du modèle de pH obtenu en présence du flocculant.

IV.4. Exploitation des modèles de 1^{er} degré

IV.4.1. Effet des paramètres linéaires et d'interaction

L'étude des effets principaux et d'interaction permet de distinguer l'influence des différents paramètres opératoires sur la réponse étudiée. La première étude consiste à voir l'influence de chaque effet dans l'absolu, c'est-à-dire, en abstraction des autres influences. Quant à la seconde, elle consiste à cerner l'influence combinée de deux facteurs à la fois, en abstraction du troisième.

IV.4.1.1. En absence du flocculant

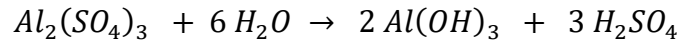
Le modèle de premier degré postulé pour expliquer l'évolution de pH en absence du flocculant :

$$pH = 6,7575 - 0,1225 x_1$$

permet de distinguer un effet dominant de la concentration du coagulant dans le sens négatif ($b_1 = -0,1225$), ce qui veut dire que le pH et la concentration du coagulant sont inversement proportionnels. En effet, l'ajout de quantités croissantes de sulfate

Chapitre IV : Modélisation du procédé coagulation-floculation

d'alumine (SA) engendre une baisse de pH, chose qui est due à la libération des ions H^+ établi par la formation d'acide sulfurique selon la réaction d'hydrolyse suivante :



Ce résultat obtenu est similaire à celui trouvé par Ayeche et al. [1]. En parallèle, aucun effet d'interaction n'est enregistré par le modèle.

Concernant le modèle de premier degré postulé pour expliquer l'évolution de la turbidité en absence du floculant :

$$Turb (NTU) = 2,5225 - 0,6525 x_2 - 0,94 x_3 + 0,72 x_{23}$$

Ce dernier laisse apparaître un effet dominant de la vitesse d'agitation ($b_2 = -0,6525$) et un effet dominant du temps d'agitation ($b_3 = -0,9494$), les deux dans le sens négatif. Au fait, plus la vitesse et le temps sont augmentés, le coagulant sera dispersé dans l'eau pour avoir une répartition homogène. Cependant, cette vitesse combinée au temps ne favorise pas l'agglomération et la formation des flocons qui vont se décanter pour donner ainsi une eau claire et limpide qui se traduit par une faible turbidité [2].

Par ailleurs, l'effet de la concentration du coagulant n'apparaît pas dans cette équation, ce qui veut dire qu'il est négligeable devant l'effet de la vitesse et le temps d'agitation. Cette remarque peut être renforcée par la présence de l'effet d'interaction vitesse d'agitation-temps d'agitation avec un signe positif ($b_{23} = +0,72$).

IV.4.1.2. En présence du floculant

Le modèle de premier degré postulé pour expliquer l'évolution de pH en présence du floculant :

$$pH = 6,8513 - 0,1613 x_1 + 0,0213 x_{23}$$

exhibe un effet dominant de la concentration du coagulant dans le sens négatif ($b_1 = -0,1613$). Au fait, le coagulant, en absence ou en présence du floculant, exerce la même fonction. Cependant, ce modèle révèle la présence d'une interaction entre la vitesse d'agitation et le temps d'agitation avec un effet positif, ce qui veut dire que ces deux facteurs combinés influent beaucoup plus sur la réponse que lorsqu'ils sont en absolu.

IV.5. Détermination des conditions optimales

Pour pouvoir déterminer les conditions de traitement optimales, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de l'eau brute à traiter. Ainsi, les caractéristiques physicochimiques mesurées de l'eau brute du barrage KOUDIAT ACERDOUNE, BOUIRA sont regroupées dans le Tableau IV.16.

Tableau IV.16 : Caractéristiques physicochimiques de l'eau brute à traiter

Caractéristiques	Valeurs
Température (°C)	15,1
pH	7,35
Turbidité (NTU)	60,6
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{m}$)	1121

IV.5.1. En absence du flocculant

IV.5.1.1. pH

La Figure IV.4 illustre l'évolution du pH en fonction de la concentration du sulfate d'alumine à vitesse d'agitation égale à 180 tr/min et à temps d'agitation égale à 15 min.

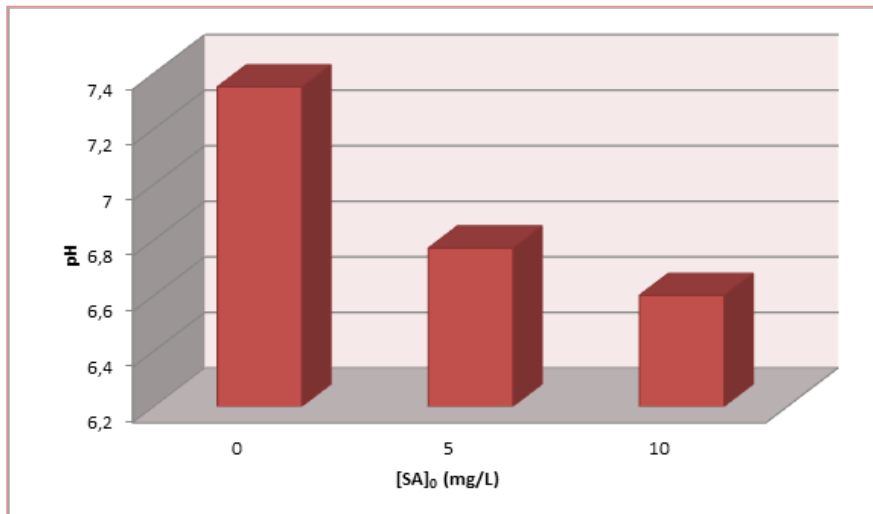


Figure IV.4 : Evolution du pH en fonction de la concentration en absence du flocculant.

Cette figure révèle que quelque soit la concentration du sulfate d'alumine étudiée, le pH obtenu après traitement en absence du flocculant est au voisinage de 6,4 et 6,7. Cet intervalle répond convenablement aux normes Algériennes exigées dans le cas des eaux de consommation (**Annexe IV**).

IV.5.1.2. Turbidité

La Figure IV.5 illustre l'évolution de la turbidité en fonction de la concentration du sulfate d'alumine à vitesse d'agitation égale à 180 tr/min et à temps d'agitation égale à 15 min.

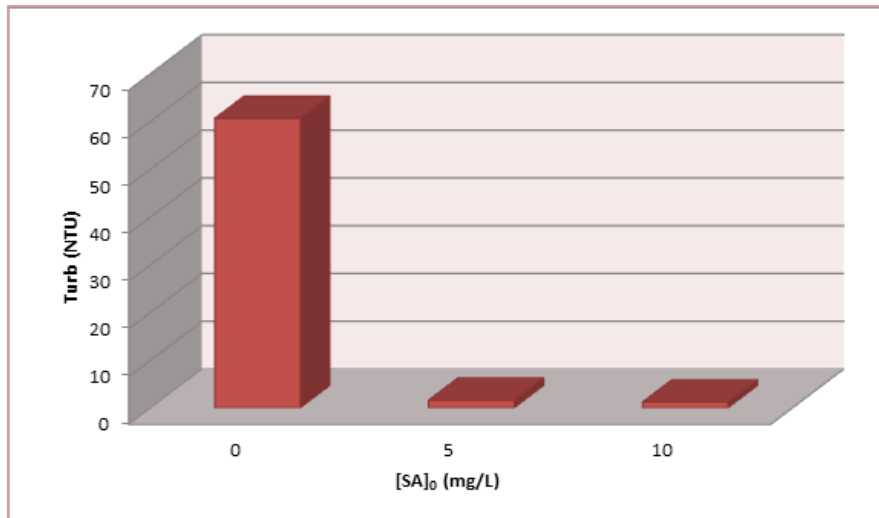


Figure IV.5 : Evolution de la turbidité en fonction de la concentration en absence du floculant.

D'après la figure, la turbidité enregistrée après le traitement, en absence du floculant, voit son évolution diminuer de 60,6 NUT à des valeurs inférieures à 5 NUT (entre 1,21 et 2,2) et cela quelque soit la concentration du coagulant utilisée. Ces valeurs sont inférieures à la valeur recommandée dans les normes Algériennes (**Annexe IV**).

IV.5.1.3. Teneur en aluminium

L'évolution de la teneur de l'aluminium en fonction de la concentration du sulfate d'alumine à vitesse d'agitation égale à 180 tr/min et à temps d'agitation égale à 15 min est illustrée dans la Figure IV.6. Cette figure laisse apparaître que la teneur en aluminium augmente dans l'eau traitée en fonction de la concentration du sulfate d'alumine ajoutée. Une teneur d'environ 0,25 mg/L est enregistrée pour une concentration de sulfate d'alumine égale à 5 mg/L. Cependant, pour une concentration de sulfate d'alumine égale à 10 mg/L, la teneur passe à 0,44 mg/L. Cette valeur n'est pas du tout recommandée dans les normes Algériennes vue la toxicité que représente l'aluminium.

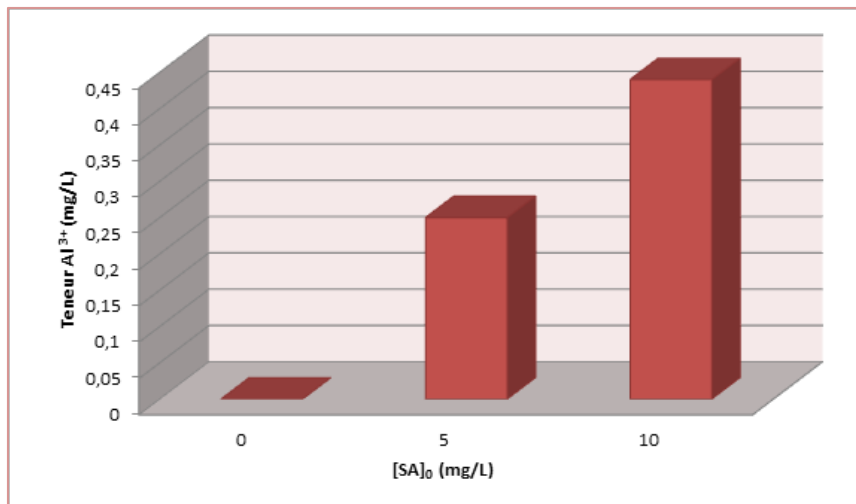


Figure IV.6 : Evolution de la teneur en aluminium en fonction de la concentration en absence du floculant.

IV.5.2. En présence du floculant

IV.5.2.1. pH

L'évolution du pH en fonction de la concentration du sulfate d'alumine à vitesse d'agitation égale à 180 tr/min et à temps d'agitation égale à 15 min, en présence du floculant, révèle des valeurs de pH qui appartiennent au domaine de normes exigées (Figure IV.7).

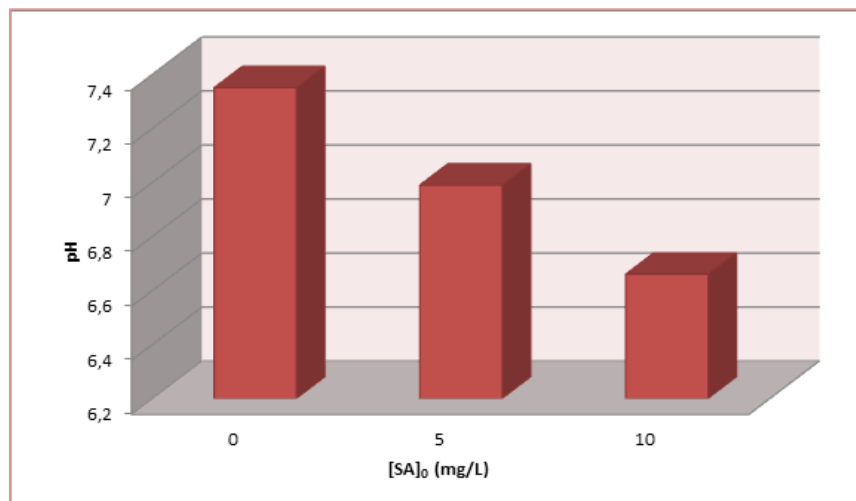


Figure IV.7 : Evolution du pH en fonction de la concentration en présence du floculant.

IV.5.2.2. Turbidité

Concernant la turbidité, la Figure IV.8 montre que la présence du floculant favorise davantage l'élimination des particules colloïdales par formation de floccs volumineux après leur déstabilisation par le coagulant. Cette élimination permet de réduire ainsi la turbidité. Les valeurs enregistrées sont inférieures à la valeur exigée par les normes algériennes.

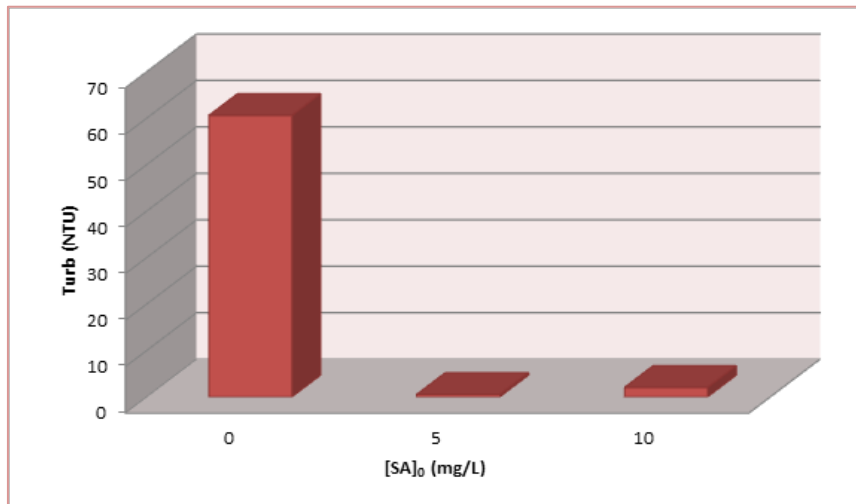


Figure IV.8 : Evolution de la turbidité en fonction de la concentration en présence du floculant

IV.5.2.3. Teneur en aluminium

De même, la Figure IV.9 montre que la présence du floculant permet de réduire davantage les cations d'aluminium. Le traitement par ajout de floculant permet d'avoir une teneur d'aluminium inférieur même à la valeur exigée par les normes < 0,2 mg/L. Cela est probablement au pontage de ces cations aux floccs formés par le floculant de nature polymérique.

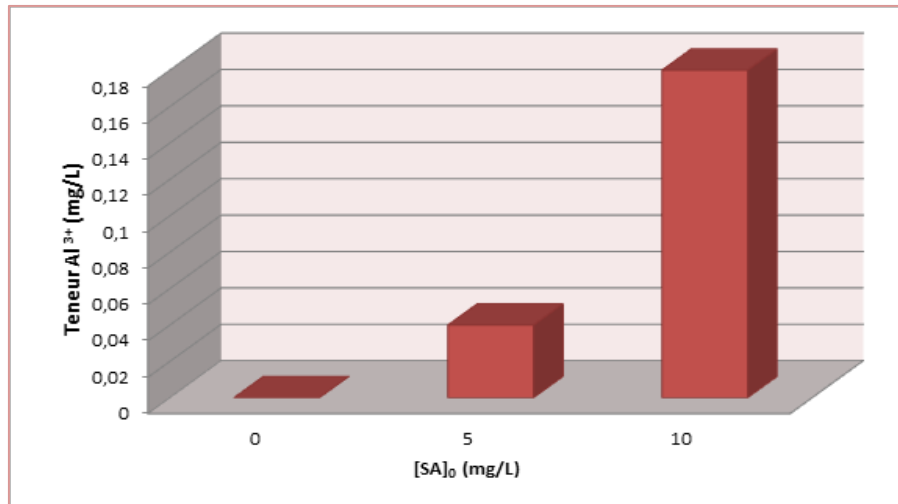


Figure IV.9 : Evolution de la teneur en aluminium en fonction de la concentration en présence du floculant.

Au final, Les résultats obtenus lors des essais en absence et en présence du floculant, montre une différence entre les deux cas. Au fait :

- l'ajout du floculant permet de diminuer la turbidité et la teneur en aluminium d'une manière significative.
- la concentration $[SA] = 5 \text{ mg/L}$ est la dose optimale, l'ajout de concentrations croissantes de SA permet de diminuer la turbidité d'une manière très significative par rapport à la valeur initiale (60,6 NTU). Mais en comparant les résultats obtenus avec une concentration de 5mg/L et 10mg/L, on a pu conclure que 5mg/L est la dose optimale, et les concentrations élevées provoquent un excès d'aluminium dans l'eau ce qui engendre une augmentation de la turbidité ;
- les conditions optimales sont : $[SA]_0 = 5 \text{ mg/L}$, $d'agitation = 180 \text{ tr/min}$, $temps = 15 \text{ min}$.

Références bibliographiques

- [1] R. Ayeche, A. Balaska, Caractérisation et traitement par coagulation-floculation d'un effluent de laiterie, Journal de la Société Algérienne de Chimie, 20(2), 2010.
- [2] W. Labguiri, N. Dennai, A. Loudini, A. Belhouari, M. Chlada, Optimisation de la coagulation floculation au niveau de la station d'épuration de Lesieur-Cristala (Casablanca, Maroc), Gestion Environnementale des Produits Chimiques, 2, pp.83-92, 2010.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au cours de la période de stage effectué au sein du laboratoire de la station de traitement des eaux potables KOUDIAT ACERDOUNE ; Bouira, nous avons étudié le procédé de coagulation-floculation par essais de jar-test, en utilisant le sulfate d'aluminium (SA) comme coagulant et le polymère comme floculant. L'objectif de ce travail était de modéliser et d'optimiser le procédé par les plans d'expériences en utilisant le plan factoriel complet (PFC) pour étudier l'effet des paramètres opératoires à savoir : la concentration du coagulant (x_1), la vitesse d'agitation (x_2) et le temps d'agitation (x_3) sur le pH, la turbidité et la teneur en aluminium de l'eau traitée.

Dans la première partie de ce travail, nous avons préparé tous les réactifs nécessaires pour l'expérimentation, le sulfate d'aluminium, le polymère, le chlorure de calcium, l'acide thioglycolique, la solution tampon et le rouge d'alizarine. Ensuite nous avons procédé aux essais de jar-test, en variant à chaque fois la concentration du coagulant, la vitesse et le temps d'agitation, en absence et en présence du floculant (polymère).

Une fois la partie expérimentale terminée, nous avons récupéré les résultats qui nous ont permis de modéliser les réponses étudiés (pH, turbidité et teneur en aluminium) par des modèles synergiques de 1^{er} degré. Ainsi, la validation par les tests statistiques, des modèles prédits obtenus pour chaque réponse, en absence et en présence du floculant, confirme que ces derniers interprètent parfaitement l'évolution du pH dans les deux cas, et la turbidité dans le premier cas. Alors que, ces modèles ne donnent aucune information réelle et prouvée sur l'évolution de la teneur en aluminium, dans les deux cas, et de la turbidité, dans le deuxième cas.

L'exploitation des modèles de 1^{er} degré obtenus, nous a permis de déterminer la gamme optimale des paramètres opératoires influant sur la coagulation-floculation. De cela, il est conseillé de travailler avec une concentration en SA, $[SA] = 5\text{mg/l}$, une vitesse d'agitation $V = 180\text{ tr/min}$ pendant une durée de $t = 15\text{min}$ (-1, 1, 1). En outre, l'ajout du polymère a permis de baisser la turbidité et la teneur en aluminium d'une manière remarquable.

Au final de ce travail, nous pouvons dire que ce dernier ouvre la voie à un grand nombre de perspectives dont nous citerons quelques unes ci-dessous:

Conclusion générale

- étude d'autres molécules de coagulant et de flocculant;
- étude de l'effet d'autres paramètres comme la force ionique et la nature des particules colloïdales;
- utilisation d'autres modèles des plans d'expériences afin de pouvoir pousser l'étude dans le sens de l'optimisation (plan composite, plan de Dolhert, plan Box-Behnken, etc.

ANNEXES

Annexe J

Table de Student

Unilatéral	0,01	0,05	0,025	0,01	0,005
Bilatéral	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	3,08	6,31	12,7	31,8	63,7
2	1,89	2,92	4,30	6,97	9,92
3	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
4	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
5	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03
6	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
7	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
8	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
9	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
10	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17
11	1,36	1,80	2,20	2,72	3,10
12	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06
13	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
14	1,35	1,76	2,15	2,62	2,98
15	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
16	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92
17	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
18	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88
19	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
20	1,33	1,73	2,09	2,53	2,85
21	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83
22	1,32	1,72	2,07	2,51	2,82
23	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81
24	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80
25	1,32	1,71	2,06	2,49	2,79
26	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78
27	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77
28	1,31	1,70	2,05	2,47	2,76
29	1,31	1,70	2,05	2,46	2,76
30	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75
40	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70
	1,28	1,65	1,96	2,33	2,58

Annexe III

Table de Fisher Senedecor pour p = 0.95

Valeurs des 95 ièmes centiles (niveaux 0.05)

$F_{0.95}$ pour la distribution F

V_1 : degrés de liberté au numérateur

V_2 : degrés de liberté au dénominateur

V_1 V_2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18.5	19,00	19,2	19,20	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,7	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,37
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,3	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,8	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,7	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,1	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,9	1,85	1,8	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,2	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

Annexe III

Normes des différents paramètres d'une eau potable

Paramètres	Unités	Normes Algériennes
couleur	mg/l échelle Pt/CO	15
Saveur	Taux de dilution	4 (à 25°C)
Odeur	Taux de dilution	4 (à 25°C)
Turbidité	NTU	5
pH	Unité de pH	6.5 à 9
Conductivité	S/cm à 20°C	2800
Température	°C	25
Alcalinité	mg/l CaCO ₃	65 pour les eaux dessalées ou démminéralisées (valeur min)
Calcium	mg/l	200
Dureté Totale (TH)	mg/l CaCO ₃	500
Sulfates	mg/l	400
sodium	mg/l	200
Potassium	mg/l	12
Chlorures	mg/l	500
Phosphore	mg/l	5
Fer total	mg/l	0,3
Manganèse	g/l	50
Azote ammoniacal	mg/l	0,5
Aluminium	mg/l	0,2
Bore	mg/l	1 : eaux conventionnelles 1.3 : eaux dessalées ou démminéralisées
Nitrites	mg/l	0,2
Nitrates	mg/l	50
Argent	g/l	100

Annexe D

Analyse physico-chimique du Sulfate d'Alumine

Détermination	Résultat	Méthodes
Teneur en Al_2O_3	17,08 %	M. Bibliographique
Taux d'insolubles	0,039 %	Filtration
Teneur en Cobalt Co	0,017 mg/Kg	SAA
Teneur en Fe_2O_3	4,7 mg/Kg	SAA
Teneur en Plomb Pb	0,043 mg/Kg	SAA
Teneur en Cuivre Cu	0,36 mg/Kg	SAA
Teneur en Cadmium Cd	0,034 mg/Kg	SAA
Teneur en Mercure	0,006 mg/Kg	SAA
Teneur en Zinc Zn	4,15 mg/Kg	SAA
Teneur en Arsenic As	0,006 mg/Kg	SAA
Teneur en Francium Fr	< 0,005 mg/Kg	SAA
Teneur en Antimoine Sb	< 0,005 mg/Kg	SAA
Teneur en Selenium Se	< 0,005 mg/Kg	SAA
Teneur en Nickel Ni	< 0,004 mg/Kg	SAA
Teneur en Chrome	< 0,005 mg/Kg	SAA
pH	3,40	pH-mètre
Aspect couleur	Granulé Blanche	Examen visuel

Annexe III

Spécifications techniques du Sulfate d'Alumine

Désignation : Sulfate d'alumine ;

Formule chimique : $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 18 \text{H}_2\text{O}$;

Usage : traitement des eaux destinées à la consommation humaine (en tant que coagulant) ;

Aspect : grains de riz noisette ;

Pureté : 16 à 18 % d' Al_2O_3 , 16 % min ;

Granulométrie : de 1,6 à 6 mm ;

Solubilité à 20°C : 610 à 750 g/l ;

Insoluble : $\leq 0,5$ % ;

Al_2O_3 libre : 0,7 à 1,1 % ;

Fer : $\leq 0,2$ % ;

Impuretés

Impureté	Maximum tolérable mg/Kg
Arsenic (As)	30
Chrome (Cr)	30
Cadmium (Cd)	3
Mercure (Hg)	10
Plomb (Pb)	30

Spécification technique du polymère

Polyélectrolyte anionique

Aspect : produit solide de couleur blanche en poudre ;

Poids sec : > 87% ;

Anionicité : faiblement anionique (17 à 27 %) ;

Poids moléculaire : $15 \cdot 10^6$ (15 unités de monomères) ;

Densité apparentée : 0,8 g/ $1 \pm 0,025$;

HP solution 0,5 % : 5 – 7 ;

Viscosité normale : 4,3 – 5.5 ;

Teneur en monomère : < 200 ppm ;

Matières insolubles : < 0,5 % ;

Particule size : < 2,1 mm ;

Temps dissolution : < 90 minutes-solution 0,5 % ;

Stabilité solution : 0,5 % 1-2 jours ;

Stabilité : le produit est à 99,5 % soluble à une concentration de 0,5 %, mais c'est préférable de travailler avec des solutions moins concentrées entre 0,1 % et 0,5 %.

Résumé

L'objectif de ce travail est l'amélioration de la qualité de l'eau en termes de turbidité, de pH et de la teneur en aluminium, par la méthode de modélisation par les plans d'expériences du procédé de coagulation-floculation effectué via des essais de jar-test, en utilisant le sulfate d'aluminium comme coagulant et le polymère comme floculant. Les expériences ont été faites sur une eau brute issue du barrage Koudiat Acerdoune. A cet effet, l'influence de la concentration du coagulant, la vitesse et le temps d'agitation sur la turbidité, le pH et de la teneur en aluminium de l'eau traitée, a été modélisée et optimisé par des modèles mathématiques de premier degré basés sur le plan factoriel complet à deux niveaux.

Mots clés : coagulation-floculation, turbidité, pH, teneur en aluminium, sulfate d'aluminium, polymère, plan factoriel complet.

Abstract

The objective of this work is the improvement of water quality, in terms of turbidity, pH and aluminum content, by the method of modeling and optimization by design of experiments of the coagulation-flocculation process carried out via by jar-test trials, using aluminum sulfate as coagulant and polymer as flocculant. The experiments were carried out on raw water from the Koudiat Acerdoune dam. For this purpose, the influence of the concentration of the coagulant, the speed and the stirring time on the turbidity, the pH and the aluminum content of the treated water, has been modeled and optimized by first mathematical models degree based on the full two-level factorial design.

Keywords : coagulation-flocculation, turbidity, pH, aluminum content, aluminum sulfate, polymer, full 2^k factorial design.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو تحسين جودة المياه, من حيث التعكر, درجة الحموضة و محتوى الألمنيوم, من خلال طريقة النمذجة و التحسين باستعمال التصميم التجريبي لعملية التخثر و التلبد عن طريق اختبارات الجرة, باستخدام كبريتات الألمنيوم كمخثر و البوليمر كملبد. أجريت التجارب على المياه الخام من سد كودية أسردون. في هذه الدراسة, اعتمدنا على تأثير تركيز المخثر, سرعة و وقت التحريك على درجة الحموضة, التعكر و محتوى الألمنيوم, التي تم نمذجتها و تحسينها من خلال نموذج رياضي من الدرجة الأولى يعتمد على خطة عاملة كاملة.

الكلمات الدالة: التعكر, درجة الحموضة, محتوياًلألمنيوم, التخثر والتلبد, كبريتات الألمنيوم, البوليمر, خطة عاملة كاملة.