

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de l'environnement

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie des procédés

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

Préparé Par : - BENARIB MARIA

- RADY MANAR

Sujet

Suivi des opérations de traitement des eaux de barrage Ain Zada

Soutenu publiquement, le 21/06/2026, devant le jury composé de :

Mme BOUFASSA Samia
Mme MAGHRAOUI Nadjah
Mr HELLATI Abdelhak
Mme MERAT Sonia

MCA
MCB
Prof
Ingénieure

Univ-BBA
Univ-BBA
Univ-BBA
Ade Ain Zada

Présidente
Examinatrice
Encadrant
Invitée

Année 2025-2026

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Mr. HELLATI Abdelhak, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, son soutien et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de consacrer leur temps à son examen.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à la direction de la station de production d'eau potable d'Aïn Zada pour nous avoir accueillis et permis de réaliser cette étude dans les meilleures conditions.

Nos remerciements s'adressent particulièrement à l'ensemble des ingénieurs, techniciens, agents de laboratoire et travailleurs de la station pour leur disponibilité, leur aide précieuse, leurs conseils et toutes les informations qu'ils nous ont fournies durant notre stage.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Mme MERAT Sonia pour son aide durant notre séjour de stage au niveau de la station de traitement ADE d'Ain Zada.

Nous remercions également tous les enseignants du département qui ont contribué à notre formation universitaire et à l'enrichissement de nos connaissances.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos parents, à nos familles et à tous ceux qui nous ont soutenus et encouragés durant nos études.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Merci à tous.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère **Touati Saliha**, source inépuisable d'amour, de tendresse et de sacrifice. Merci pour ton soutien, tes prières et tes encouragements qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours. Que Dieu te protège et te comble de bonheur.

À mon très cher père **Smail**, pour tous les efforts consentis, les valeurs que tu m'as transmises et le soutien constant que tu m'as apporté. Que Dieu te garde en bonne santé et te récompense pour tout ce que tu as fait pour moi.

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur soutien et leur présence à mes côtés.

À toute ma famille, qui m'a toujours encouragée et soutenue dans les moments difficiles.

À mes amis(es) et à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Enfin, à tous mes enseignants qui ont participé à ma formation et à mon épanouissement académique.

Maria Benarib

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes plus chers êtres au monde :

**Mon père pour son soutien moral et matériel durant toutes les étapes de ma vie,
Rien au monde ne vaut les efforts fournis jours et nuits pour mon éducation et
mon bien être.**

**A ma mère à qui je dois ma réussite, et qui m'a encouragé à aller de l'avant tu
as fait plus qu'une mère puisse fait pour que ses enfants suivent le bon chemin
dans leurs vies et leurs études**

A mes chers sœurs Hibaterrahmane, Douaa, Riham et Tawba.

**A tous ma famille grande et petite. A tous mes amis. Et enfin je dirais merci à
tous ceux qui mon soutenue**

Manar Radi

Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Table de matière	IV
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI
Liste des abréviations	XIII
Résumé	XV
Introduction.....	1
Références	2
Partie théorique	
Chapitre I : Les procédés de traitement des eaux de surface :	
I : Les procédés de traitement des eaux de surface	3
I.1.2. Dégrillage	3
I.1.3. Tamisage.....	4
I.2. Coagulation	4
I.2.1. Les paramètres influençant la coagulation	4
I.2.1.1. L’Influence du pH	4
I.2.1.2. L’Influence de la turbidité	5
I.2.1.3. Vitesse et temps d’agitation	5
I.2.1.4. L’influence de la dose de coagulant.....	5
I.2.2. Les coagulants utilisés	5
I.3. La floculation	6
I.3.1. Les floculants utilisés :.....	6
I.4. La décantation.....	6
I.4.1. Type de décantation	6

I.5. La filtration	7
I.5.1. Les différents procédés de filtration.....	8
I.5.2. Les différents types des filtres	8
I.6. La désinfection.....	8
I.6.1. Choix du désinfectant.....	9
I.6.2. Désinfection par le chlore	9
I.6.3. Désinfection par le dioxyde de chlore	9
I.6.4. Désinfection par l'ozone.....	10
Références chapitre I.....	11
Chapitre II : Généralités sur les plans d'expériences	14
II.1. Définition d'un plan d'expérience	14
II.2. Notions de base des plans d'expérience	14
II.2.1. Facteur réponse niveau.....	14
II.3. Domaine d'expérimental	16
II.4. Les types de plans	17
II.4.1. Plans factoriels complets.....	17
II.4.2. Plans factoriels Fractionnaires	17
II.5. Plan de Box-Behnken pour trois facteurs	17
II.5.1. Les avantages de plan de Box-Behnken	18
II .5.2. Propriétés des plans de Box-Behnken	18
Références chapitre II.....	18
Partie expérimentale Chapitre III : Matériels et méthodes	
III.1. Situation géographique de barrage Ain-Zada :	20
III.2. Les caractéristiques du barrage :.....	20
III.3. Présentation de la station	21
III.3.1. Les installations de la station	22
III.3.2. Les ouvrages de la station	22
III.3.3. Les procédés de traitement	23
III.3.3.1 Pré-chloration	23
III.3.3.2. Coagulation.....	23

III.3.3.3. Flocculation	23
III.3.3.4. Décantation :	23
III.3.3.5. Filtration	24
III.3.3.6. Désinfection	24
III.4. Méthodes d'analyses	25
III.4.1. Paramètres organoleptiques	25
III.4.1.1. La couleur	25
III.4.1.2. La turbidité.....	25
III.4.2. Paramètres physico-chimiques	26
III.4.2.1. Mesure du pH	26
III.4.2.2. Mesure de Température	27
III.4.2.3. Mesure de la conductivité.....	27
III.4.2.4. Mesure de l'Oxygène dissout	28
III.4.2.5. Chlore résiduel.....	28
III.4.2.6. Mesure du résidu sec.....	29
III.4.3. Paramètres spectro-photométriques.....	29
III.4.3.1. Mesure de l'aluminium.....	30
III.4.3.2. Dosage de L'Ammonium (NH_4^+)	30
III.4.3.3. Dosage des ions nitrites (NO_2^-).....	31
III.4.3.4. Dosage des nitrates (NO_3^-).....	32
III.4.3.5. Dosage des Sulfates (SO_4^{2-}).....	33
III.4.3.6. Détermination du fer.....	33
III.4.3.7. Détermination du phosphore.....	34
III.4.3.8. Détermination du manganèse	35
III.4.3.9. Dosage de sodium et de potassium	36
III.4.4. Paramètres volumétriques.....	37
III.4.4.1 La dureté totale	37
III.4.4.2. La dureté calcique	38
III.4.4.3. Le chlorure	39
III.4.4.4. La matière organique	40

III.4.4.5. Titre Alcalimétrique Complet (TAC) et (HCO_3^-).....	41
III.4.5. Paramètres de pollution organique	42
III.4.5.1. Demande Chimique En Oxygène (DCO).....	42
III.4.5.2. Azote kjeldahl :.....	43
III.4.5.3. Demande biochimique en oxygène (DBO_5)	44
III.4.6. Paramètres de traitement.....	45
III.4.6.1. Break point.....	45
III.4.6.2. Détermination de la dose de coagulant et floculant	46
III.4.7. Paramètres bactériologiques	47
III.4.7.1. Recherche des coliformes totaux :.....	47
III.4.7.2. Recherche des streptocoques	50
III.4.7.3. Recherche des spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices	52
III.4.7.4. Recherche et dénombrement des germes totaux.....	54
Références chapitre III	56
Chapitre IV. Résultats et discussions	
IV.1. Les résultats des analyses	60
IV.1.1. Les paramètres physico-chimiques	61
IV.1.1.1. pH	61
IV.1.1.2. La conductivité	62
IV.1.1.3. Oxygène dissout	63
IV.1.1.4. La turbidité	64
IV.1.1.5. L'ammonium NH_4	65
IV.1.1.6. Nitrites (NO_2^-).....	66
IV.1.1.7. Nitrate	67
IV.1.1.8. TAC	68
IV.1.1.8. Matière organique (MO)	69
IV.1.2. Les paramètres bactériologiques	69
IV.1.2.1. Coliformes totaux	70
IV.1.2.2. Coliformes fécaux (E.coli) :.....	71
IV.1.2.2.3. Streptocoques	72

IV.1.2.4. Spores	73
IV.2. Application du plan d'expérience	74
IV.2.1. Choix des facteurs d'étude	74
IV.2.2. Matrice du plan	74
IV.2.3. Analyse statistique	75
IV.2.3.1. Equation de régression en unités non codées	75
IV.2.4. Analyse des effets des facteurs (Diagramme de Pareto)	75
IV.2.5. Validation du modèle.....	76
IV.2.6. Le coefficient de détermination R^2	76
IV.2.7. Analyses des graphiques	78
1. Diagramme des effets principaux.....	78
2. Le Diagramme des effets d'interaction	79
IV.3. Les graphiques de contour et des surfaces de réponse.....	80
IV.3.1. Pour le pH=0	80
IV.3.2. Pour $C_{floc}=0$	81
IV.3.3. Pour $C_{coag}=0$	82
IV.4 Optimisation des réponses (Turbidité)	81
Conclusion.....	83
Annexe	

Liste des figures

Figure I.1 : Dégrilleur.....	4
Figure II.1 : Définition d'un plan d'expérience.....	14
Figure II.2 : Domaine de variation du facteur.....	15
Figure II.3 : Définition de l'espace expérimentale	15
Figure II.4 : Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimentale	16
Figure II.5: Définition du domaine d'étude	16
Figure II.6 : Illustration de plan de Box-Behnken	18
Figure III.1: Localisation du barrage.....	20
Figure III.2 : Schéma de la station	21
Figure III.3 : Décanteur circulaire.....	24
Figure III.4 : Filtre à sable.....	24
Figure III.5 : Spectrophotomètre	25
Figure III.6 : Turbidimètre	26
Figure III.7 : pH-mètre	27
FigureIII.8 : Conductimètre.....	28
FigureIII.9 : Oxymètre	28
FigureIII.10 : Mesure de chlore résiduel.....	29
Figure III.11 : Dessiccateur.....	30
Figure III.12 : Dosage de l'aluminium	31
Figure III.13 : Dosage de l'ammonium.....	32
Figure III.14 : Résultat de la recherche des nitrites (NO ₂)	32
Figure III.15 : Dosage des nitrates	33
Figure III.16 : Dosage de sulfate.....	34
Figure III.17 : Dosage de fer	35
Figure III.18 : Dosage de phosphore.....	37
Figure III.19 : Dosage de manganèse.....	38

Figure III.20 : Spectrophotomètre à flamme	39
Figure III.21 : Dosage de la dureté totale	40
Figure III.22 : Dosage de la dureté calcique	41
Figure III.23 : Dosage des chlorures	42
Figure III.24 : Dosage de la matière organique.....	44
Figure III.25 : Dosage de TAC.....	45
Figure III.26 : Dosage de la DCO	46
Figure III.27 : Appareille de l'azote kajeldah	47
Figure III.28 : Mesure de la DBO5	48
Figure III.29 : Break point.....	48
Figure III.30 : Jar test	49
Figure III.31: Recherche des coliforme totaux en milieu liquide	51
Figure III.32 : Recherche de coliformes totaux et fécaux en milieu solide	52
Figure III.33 : Recherche des streptocoques en milieu solide (par filtration).....	53
Figure III.34 : Recherche des streptocoques en milieu liquide	54
Figure III.35 : Recherche des spores en milieu solide	55
Figure III.36 : Recherche des spores en milieu liquide.....	57
Figure III.37 : Recherche des germes en milieu solide	58
Figure IV.1 : Variation du pH	60
Figure IV.2 : Variation de conductivité	61
Figure IV.3 : Variation de l'oxygène dissout.....	62
Figure IV.4 : Variation de la turbidité.....	63
Figure IV.5 : Variation de l'ammonium	63
Figure IV.6 : Variation des nitrites.....	64
Figure IV.7 : Variation des nitrates	65
Figure IV.8 : Variation de titre alcalimétrique	66
Figure IV.9 : Variation de la matière organique	67
Figure IV.10 : Variation des coliformes totaux.....	69

Figure IV.11 : Variation des coliformes fécaux	70
Figure IV.12 : Variation des streptocoques.....	71
Figure IV.13 : Variation des spores	72
Figure IV.14 : Diagramme de Pareto des effets normalisés de turbidité	74
Figure IV.15 : Droite de Henry	75
Figure IV.16 : Diagramme des effets principaux pour la turbidité	76
Figure IV.17 : Diagramme des interactions pour la turbidité moyenne résiduelle	77
Figure IV.18 : Graphique de contour et le diagramme de surface mettent en évidence l'effet à $pH=0$	78
Figure IV.19 : Le graphique de contour et le diagramme de surface mettent en évidence l'effet à $C_{floc}=0$	79
Figure IV.20 : Graphique de contour et le diagramme de surface en évidence l'effet à $C_{coag}=0$	80
Figure IV.21 : Graphique d'optimisation des réponses	82

Liste de tableaux

Tableau I.1 : Type de dégrillage	3
Tableau III.1: Les caractéristiques du barrage.....	20
Tableau III.2 : Les installations de la station.....	22
Tableau IV.1 : Le moyenne des résultats des paramètres des eaux de Ain zada avec les normes.....	60
Tableau IV.2 : Les résultats des paramètres bactériologique	69
Tableau IV.3: Facteurs et leurs niveaux correspondantes	74
Tableau IV.4 : Plan de Box- behnken avec les réponses expérimentales	74
Tableau IV.5 : Récapitulatif du modèle	76
Tableau IV.6 : Analyse de variance	77
Tableau IV.7 : Les conditions optimales	81

Listes d'abréviations

- **μm** : Micromètre
- **km** : Kilomètre
- **ha** : Hectare
- **m/h** : Mètre par heure (unité de vitesse de filtration)
- **m³** ou **Mm³** : Mètre cube / Million de mètres cubes
- **min** : Minute
- **NTU** : Nephelometric Turbidity Unit (Unité de turbidité néphélométrique)
- **μS/cm** : MicroSiemens par centimètre (unité de conductivité électrique)

- **pH** : Potentiel Hydrogène
- **TH** : Titre Hydrotimétrique (dureté totale de l'eau)
- **TAC** : Titre Alcalimétrique Complet

- **H₂SO₄** : Acide sulfurique
- **NaOH** : Hydroxyde de sodium (Soude caustique)
- **NaCl** : Chlorure de sodium (Sel de table)
- **RS** : Résidu Sec
- **EDTA** : Acide Éthylène Diamine Tétra-acétique
- **NET** : Noir Ériochrome T (indicateur coloré)
- **DPD** : Diéthyl-p-phénylènediamine (réactif pour le dosage du chlore)
- **%** : Pourcentage

- **NPP** : Nombre le Plus Probable (méthode statistique de dénombrement)
- **UFC** : Unité Formant Colonie
- **CT** : Coliformes Totaux
- **E. coli** : Escherichia coli
- **TTC** : Chlorure de Triphényltétrazolium (souvent associé au milieu Tergitol 7 pour le dénombrement des coliformes)
- **TSA**: TrypticSoy Agar (Glose Trypticase Soja)
- **BEA** : Glose Bile Esculine Azide (milieu d'isolement pour les entérocoques)
- **TGE** : Tryptone Glucose Extract (milieu d'isolement pour la flore totale)
- **BCPL D/C** : Bouillon Lactosé au Rouge de Phénol et à la Bile (Double Concentration)
- **BCPL S/C** : Bouillon Lactosé au Rouge de Phénol et à la Bile (Simple Concentration)

- **MO** : Matière Organique (ou Micro-organisme, selon votre contexte d'utilisation)
- **AFNOR** : Association Française de Normalisation
- **Surface PHE** : Surface de Plan d'Eau (ou Surface des Plus Hautes Eaux, selon le contexte hydraulique de votre retenue/barrage)
- **Volume PHE** : Volume de plan d'eau
- **RSM** : Response Surface Methodology (Méthodologie des surfaces de réponse)
- **Ccoag** : Concentration du coagulant
- **Cfloc** : Concentration du flocculant
- **Turb** : Turbidité
- **FIV** : Facteur d'Inflation de la Variance (VIF en anglais)
- **DL** : Degré de Liberté
- **SomCarajust** : Somme des Carrés Ajustée
- **CM ajust** : Carré Moyen Ajusté

Résumé

Cette étude porte sur le suivi du traitement des eaux du barrage d'Ain Zada au niveau de la station de production d'eau potable. La qualité de l'eau brute et traitée a été évaluée par analyses physico-chimiques et bactériologiques, montrant une amélioration après traitement. L'optimisation de la coagulation-floculation a été réalisée par un plan d'expériences de type Box-Behnken, avec une bonne adéquation du modèle et identification des facteurs influents. Les résultats confirment l'efficacité des procédés de traitement et l'intérêt des plans d'expériences pour leur optimisation.

Mots clés : Traitement de l'eau – Barrage Ain Zada – Plan d'expériences – Coagulation floculation

Abstract

This study focuses on monitoring the treatment of water from Ain Zada Dam at the drinking water production plant. Raw and treated water quality was assessed through physicochemical and bacteriological analyses, showing an improvement after treatment. The coagulation-flocculation process was optimized using a Box–Behnken experimental design, with a good model fit and identification of key influencing factors. The results confirm the effectiveness of the treatment processes and the usefulness of experimental design for optimization.

Keywords: Water treatment – Ain Zada Dam – Experimental design – Coagulation floculation

ملخص

تتناول هذه الدراسة متابعة معالجة مياه سد عين زادة على مستوى محطة إنتاج مياه الشرب. تم تقييم جودة المياه الخام والمعالجة من خلال التحاليل الفيزيائية والكيميائية والبكتريولوجية، حيث أظهرت النتائج تحسناً بعد المعالجة. وتم تحسين عملية التخثر والتليد باستعمال مخطط تجارب من نوع بوكس-بهنكن، مع توافق جيد للنموذج وتحديد العوامل الأكثر تأثيراً. تؤكد النتائج فعالية عمليات المعالجة وأهمية استعمال مخططات التجارب في التحسين

الكلمات المفتاحية : معالجة مياه – سد عين زادة – مخطط تجارب – التخثر و التليد

Introduction

L'eau est une ressource vitale pour l'homme, dont sa survie, sa santé, son alimentation, ses activités agricoles, économiques [1]. Elle est dite potable lorsqu'elle est exempte de substances chimiques et biologiques nocives pour la santé. Ainsi, le traitement de l'eau est indispensable pour respecter les normes de qualité en vigueur. [2]

Les eaux de surface, utilisées pour la production d'eau potable, contiennent généralement diverses impuretés physiques, chimiques et biologiques. Elles subissent donc plusieurs étapes de traitement (dégrillage, coagulation-floculation, décantation, filtration et désinfection) afin d'améliorer progressivement leur qualité. [3]

Parmi ces étapes, la coagulation-floculation est essentielle, car elle permet de déstabiliser les particules responsables de la turbidité et de la coloration, puis de former des floes éliminés par les étapes suivantes. Son efficacité conditionne la performance globale du traitement et la qualité finale de l'eau. [4]

La station de traitement des eaux d'Ain Zada est l'une des principales infrastructures de production d'eau potable de la région. Alimentée par le barrage d'Ain Zada, elle assure l'approvisionnement de plusieurs agglomérations et dispose d'une capacité d'environ 67 000 m³/j, permettant de répondre aux besoins en eau potable tout en respectant les normes de qualité. Plusieurs travaux ont été réalisés sur cette station, notamment celui ARAB Zahira (2022), portant sur l'étude de la coagulation-floculation et son impact sur la qualité de l'eau produite. [5]

Dans ce contexte, ce travail a pour objectif d'assurer le suivi du traitement des eaux du barrage d'Ain Zada par le contrôle de la qualité physicochimique et bactériologique à différentes étapes du procédé. Il vise également à optimiser la coagulation-floculation par l'étude des paramètres opératoires et leur modélisation via un plan d'expériences, afin d'améliorer l'efficacité du traitement et la qualité de l'eau produite. [6]

Le mémoire est structuré en deux parties : la première présente des généralités sur les procédés de traitement des eaux de surface et les plans d'expériences, tandis que la seconde est consacrée à l'étude expérimentale, incluant le site d'étude, les méthodes utilisées et l'analyse des résultats.

Références bibliographiques

[1] Alouane N., Bouchifat M., Gestion des sous-produits de l'épuration des eaux usées urbaines de la station d'épuration de la ville de Bouira, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme master, Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, 2017.

[2] Haoues N., Soualmia S., Optimisation des doses en coagulant et en floculant injectés au niveau de la station de traitement de l'eau du barrage Hammam Debagh-Guelma, mémoire de master, Université 08 Mai 1945 de Guelma, 2022.

[3] Kettab A., Traitement des eaux potables : les eaux potables, Cours, Office des Publications Universitaires, Alger, 1992.

[4] Ouchene A., Efficacité de l'élimination des composés organiques simples par des procédés physicochimiques de traitement des eaux de surface, thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif 1, 2022.

[5] Arab Z., Etude processus de traitement par coagulation de station d'Ain Zada, mémoire de master, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Bordj Bou Arreridj, 2022.

[file:///C:/Users/m/Desktop/M%C3%A9moire/m%C3%A9moire%20finale%20corrig%C3%A9%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/m/Desktop/M%C3%A9moire/m%C3%A9moire%20finale%20corrig%C3%A9%20(1).pdf)

[6] Khaldi I., Lanani H., Étude de la dégradation de la qualité de l'eau et optimisation des paramètres de traitement, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.

http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/29996/1/Khaldi_Imane_Lanani_Hana.pdf

Partie théorique

Chapitre I

I. Les procédés de traitement des eaux de surface

I.1. Prétraitement :

Une eau, avant d'être traitée, doit être débarrassée de la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature et la dimension constitueraient une gêne pour les traitements ultérieurs. Pour cela, on effectue des prétraitements de l'eau de surface. Dans le cas d'une eau potable, les prétraitements sont principalement de deux types : [1]

- Dégrillage.
- Tamisage.

I.1.2. Dégrillage :

Le dégrillage, premier poste de traitement, indispensable sur les eaux de surface et les eaux résiduaires, permet de protéger les ouvrages avals contre l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation. L'opération est plus ou moins efficace, en fonction de l'écartement entre barreaux de grille. On peut distinguer :

Tableau I.1 : Type de dégrillage. [2]

Type de dégrillage	L'écartement
Pré-dégrillage	Supérieur à 40 mm
Dégrillage moyen	10 à 40 mm
Dégrillage fin	6 à 10 mm
Tamisage	0,5 à 10 mm

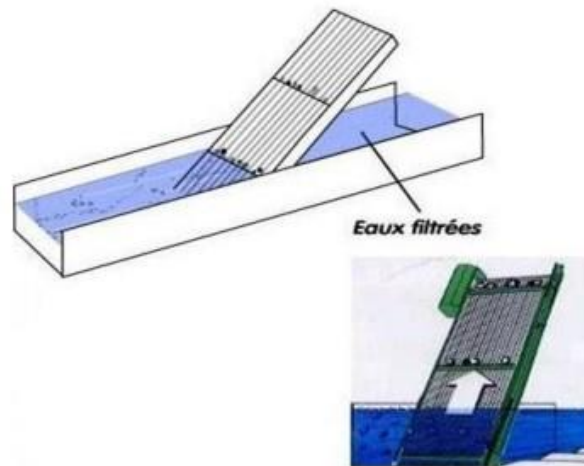


Figure I.1 : Dégriilleur. [3]

I.1.3. Tamisage :

Le but de ce dispositif est de piéger les particules solides charriées par les eaux et les matières en suspension de granulométrie comprise entre 200 et 500 μm : sables, graviers, feuilles ou de morceaux de plastique...etc., brièvement il permet d'éliminer des objets plus fins que ceux éliminés par le dégrillage. [4]

I.2. Coagulation :

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par les particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité (portant des charges négatives sur leur surface, elles ont tendance à se repousser). Pour éliminer ces particules, 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 faciliter leur agglomération, donc déstabiliser les colloïdes en diminuant les forces de répulsion électrostatiques : En pratique ce procédé est caractérisé par la neutralisation des charges négatives en ajoutant un réactif de charge positive ou coagulant. [5]

I.2.1. Les paramètres influençant la coagulation :

I.2.1.1. L'Influence du pH :

Le pH est un des paramètres qui affecte beaucoup plus la coagulation-floculation. Son contrôle est donc conseillé. Selon les caractéristiques d'une eau, il existe un pH optimal permettant la meilleure coagulation. Ce pH se situe souvent dans la plage où la solubilité du coagulant utilisé est minimale,

Chapitre I : Les procédés de traitement des eaux de surface

ce qui donne une meilleure précipitation. Le contrôle du pH permet aussi d'améliorer la coagulation lorsque la température de l'eau est faible.[6]

I.2.1.2. L’Influence de la turbidité :

La turbidité influence la formation des floes lors de la coagulation. Une turbidité élevée signifie une grande quantité de particules colloïdales en suspension, ce qui augmente les collisions et favorise la formation de floes plus gros et plus résistants en un temps réduit. En revanche, une faible quantité de particules produit des floes plus petits, ce qui ralentit la sédimentation et prolonge le temps de décantation. [7]

I.2.1.3. Vitesse et temps d’agitation :

La phase de mélange est un élément crucial dans le processus de coagulation. Elle a pour objectif de distribuer de manière homogène le coagulant dans l'échantillon d'eau pendant le processus de coagulation. Dans ce contexte, la rapidité de l'agitation est cruciale pour garantir une dispersion et une homogénéité du coagulant. Selon Ding et al. (2019), la vitesse idéale d'agitation se trouve généralement entre 40 et 200 tours par minute. [7]

I.2.1.4. L’influence de la dose de coagulant

La détermination de la concentration du coagulant est un paramètre clé pour la déstabilisation des colloïdes. En effet, une dose de coagulant excessive entraîne une re-stabilisation des particules et une augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité insuffisante de l'eau traitée. La quantité de réactifs ne peut donc se déterminer facilement. Pratiquement, la dose optimale de coagulant peut être déterminée soit par la mesure du potentiel zêta, soit par un test au laboratoire connu sous le nom de "Jar-Test". [8]

I.2.2. Les coagulants utilisés :

I.2.2.1. Sels d’aluminium

- Sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) (alun)
- Chlorure d'aluminium (AlCl_3)
- Aluminate de sodium (NaAlO_2)

I.2.2.2. Sels de fer

- Chlorure ferrique (FeCl_3)

Chapitre I : Les procédés de traitement des eaux de surface

- Sulfate ferrique ($(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3)$)

- Sulfate ferreux (FeSO_4)

Les produits les plus utilisés sont les sels d'aluminium et le chlorure ferrique. Ces coagulants, une fois introduits dans l'eau, forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation

I.3. La floculation :

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité de rencontre entre les particules grâce à l'agitation du fluide.[9]

I.3.1. Les flocculants utilisés :

- ✓ Les flocculants minéraux :
 - La Silice activée
 - Silico-aluminate
- ✓ Les flocculants organiques :
 - Les polymères organiques d'origine naturelle.
 - Les polymères organiques de synthèse. [10]

I.4. La décantation :

La déstabilisation des colloïdes et leur agrégation en floccs suffisamment grands facilitent leur sédimentation sous l'influence des forces gravitationnelles. Il reste à établir un flux hydraulique qui favorise la sédimentation de ces floccs, relativement légers, dans une structure d'où ils peuvent être facilement retirés. Par conséquent, la décantation est le processus d'élimination des particules dont la densité relative dépasse celle de l'eau. Après cette procédure de traitement, il est nécessaire de prévoir la gestion des sédiments qui se sont accumulés au fond du bassin de décantation. [11]

I.4.1. Type de décantation :

Selon la concentration en solides et la nature des particules (densité et forme), on distingue quatre types de décantation : la décantation de particules discrètes, la décantation de particules

Chapitre I : Les procédés de traitement des eaux de surface

floculantes, la décantation freinée et la décantation en compression de boue en traitement des eaux en rencontre type I et II

Type I : Décantation de particules discrètes Ce type de décantation (dite discrète ou individuelle) est caractérisé par le fait que les particules conservent leurs propriétés physiques initiales (forme, dimension et densité) au cours de leur chute. La vitesse de chute est indépendante de la concentration en solides ; c'est pourquoi les lois classiques de Newton et de Stokes s'appliquent ici. On retrouve ce type de décantation dans les dessableurs.

Type II : Décantation de particules floculantes Ce type de décantation est caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leur chute. Les propriétés physiques de ces particules (forme, dimension, densité et vitesse de chute) sont donc modifiées pendant le processus. On retrouve ce type de décantation dans les décanteurs des usines de traitement des eaux et dans les décanteurs secondaires des usines d'épuration. [12]

I.4.2. Types de décanteurs :

Les décanteurs horizontaux : ou décanteurs « couloir », sont des ouvrages allongés de forme parallélépipédique où l'eau circule en écoulement horizontal pour y être clarifiée. L'eau décantée est collectée à l'aval, tandis que les boues se déposent au fond du bassin. La vitesse de chute des particules dépend principalement de la surface de décantation plutôt que de la hauteur d'eau. C'est pourquoi ces décanteurs comportent souvent plusieurs niveaux superposés de faible hauteur. Cependant, une hauteur minimale reste nécessaire pour permettre l'accumulation suffisante des boues avant leur évacuation. [13]

Les décanteurs lamellaires : Il s'agit d'un ouvrage de décantation dans lequel des lamelles parallèles inclinées permettent de multiplier la surface de décantation utile tout en réduisant la surface au sol par rapport à un bassin de décantation classique à flux horizontal. Les décanteurs utilisant des plaques ou des tubes réalisent également une décantation considérable plus rapide que la décantation classique. [14]

I.5. La filtration :

La filtration est une technique qui permet de clarifier un liquide chargé en matières en suspension en le faisant passer à travers un matériau granulaire poreux. Les particules sont retenues à la surface des grains grâce à des forces physiques, et l'efficacité de la rétention dépend des conditions de filtration et du matériau utilisé. Au fil du temps, l'espace entre les grains se réduit, entraînant un

Chapitre I : Les procédés de traitement des eaux de surface

colmatage du filtre et une augmentation des pertes de charge, ce qui nécessite un contre-lavage. Par ailleurs, une biomasse peut se développer sur le média filtrant et contribuer à la réduction de l'ammonium par nitrification. La filtration permet ainsi d'éliminer une partie des bactéries, de la couleur et de la turbidité. [15]

I.5.1. Les différents procédés de filtration :

La filtration par gravité : Le mélange est soumis uniquement à la pression atmosphérique. Le liquide passe à travers le support filtrant, tandis que le solide est récupéré sur le support filtrant.[16]

La filtration par surpression : La suspension arrive sous pression dans le filtre.

La filtration sous pression réduite : Le mélange est exposé, d'un côté du filtre, à la pression atmosphérique, tandis que de l'autre côté, où le filtrat s'écoule, une dépression est générée à l'aide d'une pompe à vide. Au cours du processus de filtration d'une suspension à travers un milieu filtrant, le fluide s'écoule à travers les ouvertures, tandis que les particules sont retenues. Ces particules finissent par constituer un second milieu filtrant lorsqu'elles s'entrelacent. Les autres particules se déposent de façon constante, formant un gâteau dont l'épaisseur augmente progressivement à mesure que la suspension s'écoule. [11]

I.5.2. Les différents types des filtres :

Les filtres ouverts : la plupart des installations filtrantes destinées à l'alimentation en eau potable utilisent ce type de filtre

- ✓ **Les filtres à sable rapides :** travaillant à des vitesses de filtration entre 5 à 10 m/h.
- ✓ **Les filtres à sable lents :** constituer trois étages de filtration.

Les filtres fermés :

- ✓ **Les filtres sous pression :** sont en général métalliques. [17]

I.6. La désinfection :

La désinfection, une étape commune à tous les traitements de l'eau, est effectuée à l'aide d'agents désinfectants tels que le chlore, la dioxine de chlore ou l'ozone. L'ozone, contrairement au chlore, offre une désinfection efficace sans produire de sous-produits chlorés ni de goût indésirable. Cependant, son utilisation n'est pas durable à long terme. Après son traitement, l'eau doit parcourir un réseau de tuyauterie pour arriver aux robinets. Si aucune désinfection finale n'est prévue, la qualité de l'eau du robinet pourrait se détériorer. C'est pour cette raison qu'une petite dose de chlore

Chapitre I : Les procédés de traitement des eaux de surface

(correspondant à une goutte pour 1000 litres) est ajoutée afin d'éliminer les résidus bactériens restants et de maintenir la qualité de l'eau durant son trajet à travers les tuyaux. [18]

I.6.1. Choix du désinfectant

Le choix d'un désinfectant doit tenir compte du fait que les procédés et produits de désinfection diffèrent selon les situations. Il est donc important de sélectionner la méthode la plus adaptée en fonction de plusieurs paramètres liés à l'eau (ses caractéristiques et son usage), aux types de micro-organismes à éliminer ainsi qu'à l'état du réseau de distribution. De manière générale, un agent désinfectant doit être efficace, compatible avec la qualité de l'eau et adapté aux conditions d'application. [19]

I.6.2. Désinfection par le chlore :

L'injection de chlore se fait à deux endroits distincts : au point de captage d'eau et à la station, en employant des chlorométries.

La concentration de chlore diminue graduellement à partir de la source, et à un certain stade, elle peut ne plus être efficace en tant que désinfectant, encourageant par conséquent le développement des bactéries dans les réseaux de distribution.

Parmi les bénéfices de l'emploi du chlore, on trouve son efficacité avérée contre les agents pathogènes microscopiques, sa simplicité d'application et son coût relativement modeste par rapport à d'autres produits désinfectants. Toutefois, son emploi peut engendrer des résidus de désinfection potentiellement préjudiciables à la santé humaine, tels que les trihalométhanes.

Parmi les désavantages figurent aussi la formation de saveurs et d'arômes non souhaités dans l'eau purifiée, ainsi que des problèmes écologiques liés à son déversement dans les eaux résiduelles. [20]

I.6.3. Désinfection par le dioxyde de chlore :

Le dioxyde de chlore possède d'excellentes qualités de désinfection. Il est efficace contre une multitude de micro-organismes fréquemment présents dans l'eau, tels que les bactéries et les virus ; néanmoins, son efficacité est moindre face à certains protozoaires (par exemple, les oocystes de *Cryptosporidium*). Comparé à l'effet désinfectant du chlore, celui du dioxyde de chlore est meilleur à concentration égale. On se sert du produit $C \times T$ (concentration du désinfectant $\times$ temps de contact) pour identifier son activité. La quantité requise varie considérablement en fonction de la demande en chlore de l'eau brute. Pour garantir une désinfection efficace, la turbidité de l'eau doit impérativement être inférieure à 1 UTN. Le dioxyde de chlore est particulièrement approprié pour la protection du réseau, grâce à sa forte stabilité dans l'eau traitée. [21]

I.6.4. Désinfection par l’ozone :

L'ozonation est souvent employée pour le traitement des eaux de surface. En plus d'une désinfection hautement efficace, il y a de nombreux autres objectifs attendus, tels que ceux en tête de liste :

- ✓ Le traitement des algues, des goûts et odeurs.
- ✓ La modification de la matière organique qui réduit le potentiel de création de sous-produits lors de la chloration et favorise la production de carbone organique biodégradable (plus facilement éliminable).
- ✓ L'élimination du fer et du manganèse (qui sont ensuite retenus sur des filtres),
- ✓ L'oxydation des nitrites. [22]

Références bibliographiques chapitre I

- [1] Hernandez de Léon H., Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable, mémoire doctorat, institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [2] Piemont A., et al, Memento Technique de l'eau, Le Memento Degrémont de SUEZ, La dixième et dernière édition papier française du Mémento est parue en 2005, la version anglaise en juin 2007.
- Site web <https://www.suezwaterhandbook.fr/Procedes-et-technologies/Pretraitements/degrillage-tamissage-dilaceration/degrillage> consulté le 01/04/2026.
- [3] Echchibani A., Taibi M., Automatisation & Supervision d'un Dégrilleur Escalier pour la STEP de Réghaia, mémoire master, Université Saad Dahlab de Blida, 2021.
- [4] Aoualmia A., Gasmallah K., Modélisation du système de coagulation-floculation : cas de la station de traitement de l'eau potable Ain Dalia–Souk Ahras, mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2015.
- [5] Makhloufi N., Modélisation des paramètres physico-chimiques de la coagulation floculation pour les eaux potables, mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2011.
<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/1390/1/MAKHLOUFI%20Nouredine.pdf>
- [6] Bouazza L., Effet de la coagulation-floculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain El Houtz, mémoire de magister, Université Abou Bekr-Belkaïd, Tlemcen, 2011.
- [7] Ro'in N., Coagulation-flocculation process in water remediation, Environmental and Toxicology Management, vol. 4(N°1), pp. 1-8, 2024.
- [8] Behloul S., Contribution à l'étude de l'élimination des micropolluants des eaux par le procédé de coagulation-floculation, thèse de doctorat, université Hadj Lakhdar Batna 1, Batna, 2021.

Chapitre I : Les procédés de traitement des eaux de surface

[9] Marsa Z., Étude de l'effet de différents coagulants et adsorbants sur la qualité de l'eau potable de la station de Skikda, thèse de doctorat en sciences, Pollution chimique et environnement, Université 20 Août 1955, Skikda, 2015.

<http://dspace.univ-skikda.dz:8080/server/api/core/bitstreams/78b06380-7c06-4bd7-b773-da7c9be1008d/content>

[10] Salvé J., Développement de matériaux hybrides chitosan-montmorillonite pour la coagulation-floculation des eaux naturelles : de l'étude de la relation structure-réactivité en eaux modèles à l'application au traitement d'eaux de rivière, thèse de doctorat, Université de Poitiers, École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, France, 2022.

[11] Kouidri Z., Etude et traitement de l'eau du barrage Djorf–Eltorba de la wilaya de Bachar par filtration sur sables, mémoire magistère, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2006.

https://bu.univ-chlef.dz/doc_num.php?explnum_id=313

[12] Desjardins R., le traitement des eaux ,2^eédition revue et enrichie, presses internationales polytechnique de Montréal, Paris, 1997.

[13] Jestin E., La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires, agence de l'eau seine-Normandie, 2006.

https://bdd.pseau.org/outrils/ouvrages/aesn_rivieres_de_basse_normandie_la_production_et_le_traitement_des_eaux_destinees_a_l_alimentation_et_a_la_preparation_de_denrees_alimentaires_2006.pdf

[14] Chambéry métropole, Techniques classiques de dépollution des eaux pluviales- Les décanteurs, 2006.

<https://www.graie.org/graie/graiedoc/reseaux/Racco/racc-biblio-guide-chamberydecanteur-13.pdf>, consulter le 15/04/2026

[15] Cardot C., Les traitements de l'eau : Procédés physico-chimiques et biologiques cours et problèmes résolus, Ellipses, Edition Marketing, Paris, 1999.

https://ia801900.us.archive.org/29/items/les-traitements-de-leau/Les%20traitements_de%20_l%27eau.pdf

Chapitre I : Les procédés de traitement des eaux de surface

- [16] Selka M., Influence des particules argileuses sur la coagulation-floculation, mémoire de master, université Abou Baker Belkaïd, Tlemcen, 2013.
- [17] Degrémont, Mémento technique de l'eau, 8^e édition, Paris, Technique et Documentation, 1978.
- [18] Centre d'information sur l'eau, Quels traitements sophistiqués pour rendre l'eau potable, <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/quels-traitements-sophistiques-pour-rendre-leau-potable/> consulté le 26/03/2026.
- [19] Rahal D., Toubi N., Étude de l'efficacité du processus de chloration au niveau de la station de traitement de l'eau du barrage Bouhamdane-Guelma, mémoire de master, Université 08 Mai 1945 Guelma, 2023.
- [20] El jaraouyl O., Processus de production d'eau potable et gestion de la qualité à la Station de Traitement de Bouregreg, Projet de fin d'étude, Licence d'Excellence en Valorisation des Produits du Terroir, 2024.
- [21] Office fédéral de la santé publique (OFSP), Procédés reconnus destinés au traitement de l'eau potable, Berne, Suisse, 2011.
fr.scribd.com/document/56920817/Traitement-de-l-Eau-Potable consulter le 22/03/2026
- [22] Legube B., Production d'eau potable : Filières et procédés de traitement, Paris, Dunod, 2015.

Chapitre II

Chapitre II : Généralités sur les plans d'expériences

II.1. Définition d'un plan d'expérience :

Les plans d'expériences sont des méthodes utilisées pour organiser les essais scientifiques et industriels afin d'obtenir un maximum d'informations avec un minimum d'expérimentations. Ils permettent d'étudier l'influence de différents facteurs sur un système et d'optimiser ses performances. Ces méthodes sont appliquées dans plusieurs domaines tels que l'agronomie, la biologie, la chimie, l'électronique, le marketing, la mécanique et la physique. Leur utilisation aide à mieux comprendre le fonctionnement des systèmes de type « **boîte noire** » grâce à une démarche expérimentale basée sur les résultats des essais. Une connaissance préalable minimale du phénomène étudié reste toutefois nécessaire avant la réalisation des expérimentations. [1]

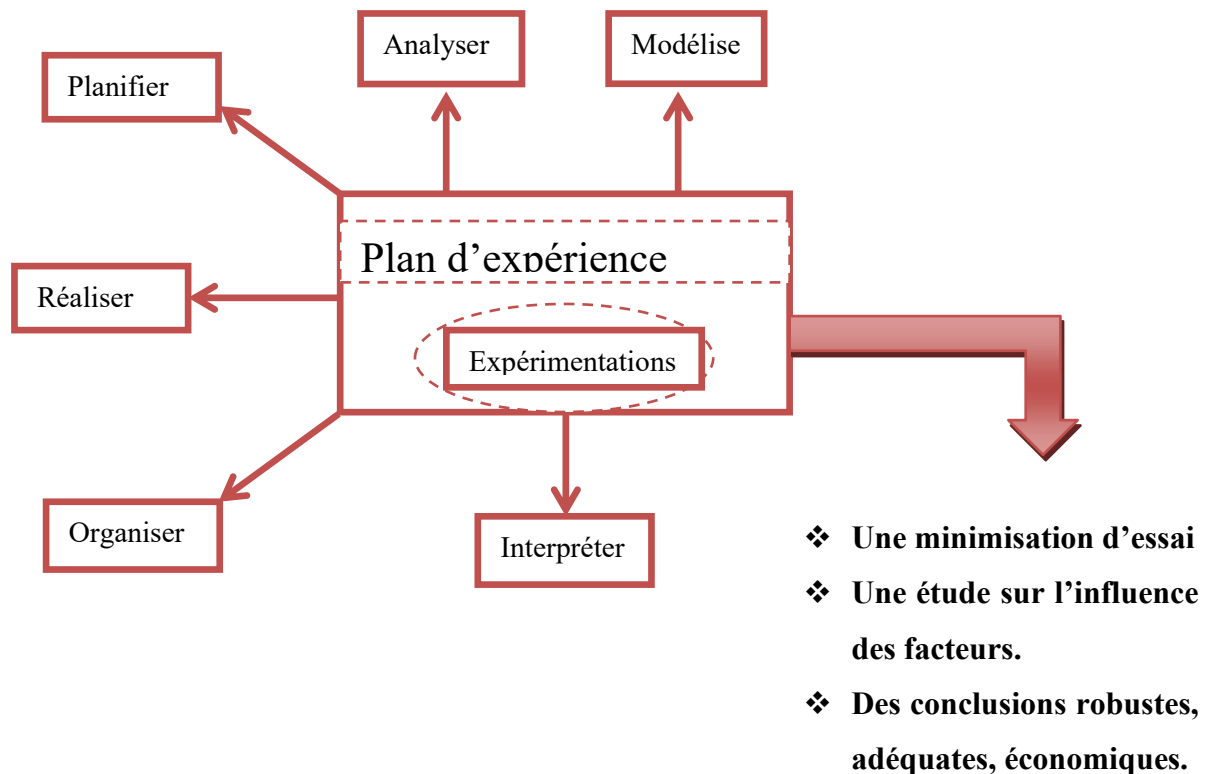


Figure II.1 : Définition d'un plan d'expérience.

II.2. Notions de base des plans d'expérience

II.2.1. Facteur réponse niveau :

La grandeur d'intérêt mesurée à chaque essai est appelée la réponse. La valeur de cette réponse, dépend de plusieurs variables. Au lieu de terme variable nous emploierons le mot facteur.

Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.2). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsque l'on étudie l'influence d'un facteur, en

Chapitre II : Généralités sur les plans d'expériences

général, on limite ses variations entre deux bornes (borne inférieure c'est le niveau bas ; borne supérieure c'est le niveau haut).

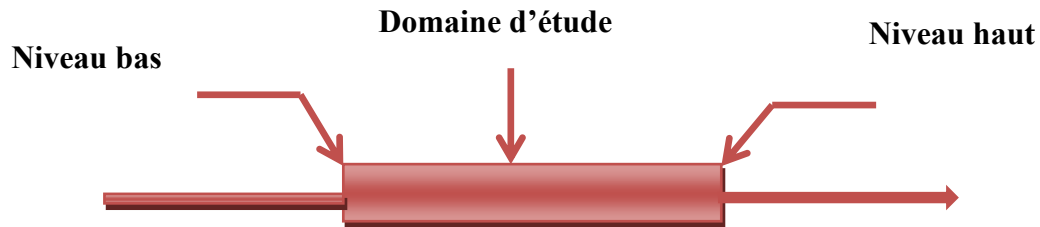


Figure II.2: Domaine de variation du facteur

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

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau bas, son niveau haut et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure II.3).

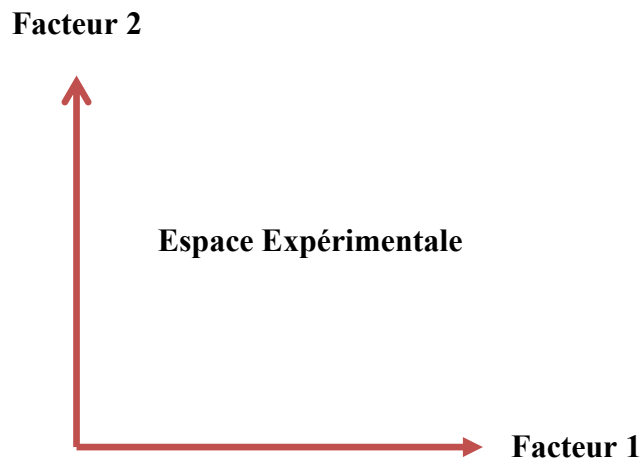


Figure II.3 : Définition de l'espace expérimentale.

Le niveau x_1 , du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.4)

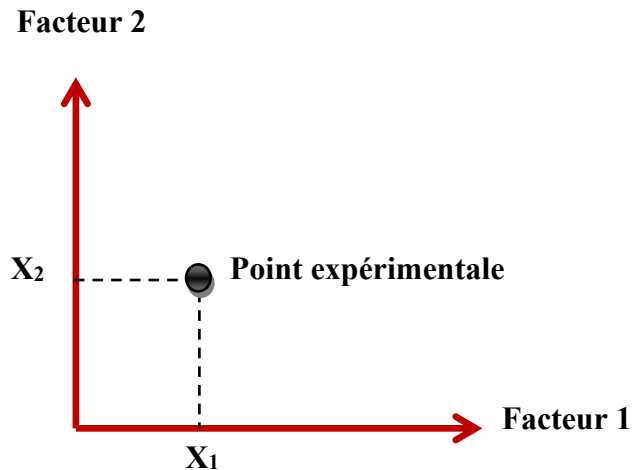


Figure II.4 : Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental.

Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

II.3. Domaine d'expérimentale

Une interprétation géométrique permet de mieux comprendre la construction des plans d'expériences et de mieux interpréter les résultats. Lorsqu'il y a n facteurs, il faut raisonner dans des espaces à n dimensions. Pour fixer les idées, on prend l'exemple de deux facteurs x et y à deux niveaux (+1) et (-1). Le domaine expérimental est le plan x - y dans lequel toutes les valeurs de x et de y sont possibles. Mais, en général, un expérimentateur limite les variations des facteurs étudiés. On appelle domaine d'étude tous les points de la surface délimitée par les niveaux bas et haut de chaque facteur. [2]

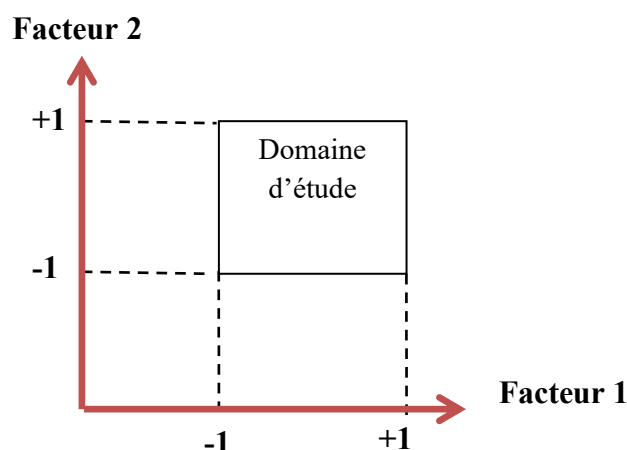


Figure II.5 : Définition du domaine d'étude.

II.4. Les types de plans

II.4. Plans factoriels complets

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel. Le nombre d'essais N se calcule d'après la formule suivante : $N = 2^k$ où k est le nombre de facteurs ($k=3$). Dans ce but, nous avons établi un diagramme de cause-effet et ce pour estimer l'influence des paramètres tels que la turbidité, le pH et la température sur le taux de coagulant. On commence par un plan factoriel classique du premier degré. [3]

II.4.2. Plans factoriels Fractionnaires

Comme les plans factoriels complets, les plans factoriels fractionnaires possèdent des facteurs ayant chacun deux niveaux, un niveau bas et un niveau haut. Mais, on ne réalise pas toutes les combinaisons de niveaux. En effet, le nombre d'essais des plans factoriels complets augmente rapidement avec le nombre de facteurs. Il n'est pas rare de rencontrer des études faisant intervenir 7 ou 8 facteurs. Il est bien sûr déraisonnable de vouloir exécuter $2^7 = 128$ ou $2^8 = 256$ essais. On sélectionne une fraction des essais d'un plan complet pour construire un plan fractionnaire. Cette sélection est basée sur des considérations mathématiques qui seront mises en application grâce au calcul de Box. Il est aussi possible d'utiliser les logiciels de plans d'expériences qui mettent en œuvre ces principes mathématiques. L'interprétation des plans fractionnaires est moins facile que celle des plans complets puisqu'on possède moins d'information. On se contente souvent de savoir quels sont les facteurs influents, et parfois on va un peu plus loin en examinant les interactions d'ordre 2.

II.5. Plan de Box-Behnken pour trois facteurs

Box et Behnken ont proposé en 1960 ces plans qui permettent d'établir directement des modèles du second degré. Tous les facteurs ont trois niveaux : -1 , 0 et $+1$. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquentialité. Le plan de Box-Behnken en pour trois facteurs est illustré par la figure. Le cube possède 12 arêtes. On a l'habitude d'ajouter des points d'expériences au centre du domaine d'étude, en général trois. Le plan de Box-Behnken pour 3 facteurs a donc $12 + 3$ essais, soit 15 essais. C'est le plan classique indiqué par Box-Behnken. [4]

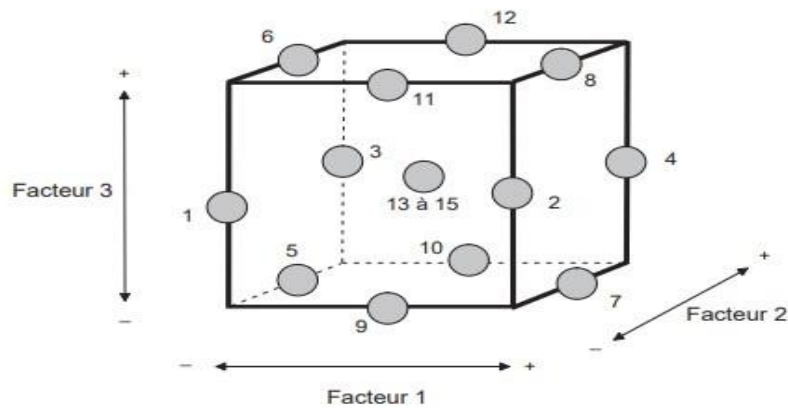


Figure II.6 : Illustration de plan de Box-Behnken.

II.5.1. Les avantages de plan de Box-Behnken :

- 1) Réduction du nombre d'essais expérimentaux.
- 2) Moins coûteux en temps et en ressources.
- 3) Ne teste pas les combinaisons où tous les facteurs sont simultanément à leur niveau maximal ou minimal.
- 4) Évite les réponses non satisfaisantes (très élevées ou très faibles).
- 5) Adapté aux situations où certains essais sont coûteux ou impossibles à réaliser à cause des contraintes physiques du procédé.
- 6) Utilisé dans plusieurs domaines scientifiques.
- 7) Utilisé pour l'optimisation de processus chimiques et physiques. [5]

II .5.2. Propriétés des plans de Box-Behnken :

Les plans de Box-Behnken possèdent les propriétés suivantes :

- Ils nécessitent 3 niveaux pour chacun des facteurs ; -1 , 0 et $+1$ pour assurer la condition d'orthogonalité ;
- Ils possèdent la propriété de séquentialité ;
- Ils peuvent respecter le critère de presque orthogonalité, si on met 4 points au centre pour le plan à 3 facteurs et 12 points au centre pour le plan à 4 facteurs ;
- Les erreurs de prédiction sur les réponses calculées sont plus faibles que les erreurs expérimentales. [6]

Chapitre II : Généralités sur les plans d'expériences

Références bibliographiques chapitre II :

- [1] Bendahmane A., Caractérisation expérimentale de la neutralisation électrostatique activée par la méthodologie des plans d'expérience, thèse de doctorat en Sciences, Université Mohammed Seddik Ben Yahia de Jijel, 2014.
- [2] Bouabssa K., La méthode des plans d'expériences dans la conception des structures en béton : cas des structures de forme irrégulière, mémoire de magister, Université Saad Dahlab de Blida, 2009.
- [3] Benalia A., Étude expérimentale et modélisation du processus de la coagulation floculation : Application aux eaux destinée à la consommation, mémoire de magister, Université Constantine3, 2015.
- [4] Goupy J., Creighton L., Introduction aux plans d'expériences. 3^{ème} édition, Paris, Dunod, 2006.
- [5] Benyahia N., Séparation des ions de Bi (III) et Pb (II) par membrane liquide émulsionnée. Optimisation et modélisation du procédé, thèse doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2015.
- [6] Sefrou Z., Séparation des ions de lanthane (III) par la technique de point de trouble. Optimisation expérimentale et statistique, thèse doctorat, Université Abou-Beker Belkaïd, Tlemcen, 2020.

Partie expérimentale

Chapitre III

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Situation géographique de barrage Ain-Zada :

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers un cours d'eau, dans le but de créer des réservoirs (retenues) qui permettent d'accumuler l'eau durant les périodes pluvieuses pour pouvoir en distribuer ensuite durant les périodes sèches. Il est situé dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj à 25 km à l'ouest de Sétif et à 40 km à l'est de Bordj Bou Arreridj. Il est implanté dans la commune d'Ain-Taghrout sur l'Oued Boussellam (direction Sud-Nord) au niveau de la jonction avec l'Oued Ain-Taghrout à l'ouest, l'Oued Kharoua au Nord-est et l'Oued Malah au Sud-est. [1]



Figure III.1 : Localisation du barrage [2]

III.2. Les caractéristiques du barrage :

Tableau III.1 : Les caractéristiques du barrage [1]

Type de barrage	En terre
Capacité initiale	125.000 Mm ³
Cote retenue normale	855 m
Cote minimale	828,12 m
Surface PHE	1920 ha
Volume PHE	261,200 mm ³
Année de mise en eau	Novembre 1985

III.3. Présentation de la station :

La station est mise en service en 1991, prend son eau dans le réservoir créé par le barrage d'Ain Zada. Ce réservoir d'une capacité initiale de 125 000 000 m³ était rempli à environ 30% de sa capacité lors de notre passage. L'ouvrage de prise est constitué par une tour de 38 m de hauteur ayant trois prises, soit à l'élévation 827,838 et 848 m. Lors de notre passage, la prise d'eau située à l'élévation. La station alimente environ 70% de l'eau vers l'unité B.B.A et 30% vers l'unité Sétif (Bougaa, Beni-Oussin) via une station de pompage.



Figure III.2 : Schéma de la station.

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.3.1. Les installations de la station :

Tableau III.2 : Les installations de la station.

1.I : Bassin de mélange 1 ^{ère} extension	3. II : Station de filtration 2 ^{ème} extension	8 : Dosage du coagulant
2. I : Station de décantation 1 ^{ère} extension	4 : Laboratoire	9 : Dosage du floculant
3. I : Station de filtration 1 ^{ère} extension	5 : Réservoir 1000 m ³	10 : Dosage de l'eau de javel
1.II : Bassin de mélange 2 ^{ème} extension	6 : Réservoir 500 m ³	11 : Dosage du charbon actif
2. II : Station de décantation 2 ^{ème} extension	7 : Station de pompage	12 : Réservoir de l'eau de service

III.3.2. Les ouvrages de la station :

Bâtiments de réactif :

1. **Dosage de polymère :** Ce poste comprend : un bac de préparation, trois agitateurs, un entonnoir d'entrée du produit ainsi une pompe de dosage.

2. **Dosage de coagulant :** Le coagulant utilisé est le sulfate d'aluminium

Ce poste comprend :

- Deux (02) bacs de préparation (73 m³/ bac) ;
- Un (1) bac de dosage (10 m³) ;
- Pompe pour dissolution du sulfate ;
- Débitmètre.

3. **Dosage de l'eau de javel :**

Ce poste comprend :

- Six (06) cuves raccordées pour le stockage de l'eau de javel ;
- Doseurs du chlore ;
- Eau de service ;
- Stockage des fûts de chlore.

4. **Dosage de charbon actif :**

Ce poste comprend :

- Cuve de stockage du charbon actif ;

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Un système de préparation de la suspension ;
- Un agitateur pour maintenir le mélange homogène ;
- Une pompe doseuse.

III.3.3. Les procédés de traitement :

III.3.3.1. Pré-chloration : est une étape préliminaire dans la production d'eau potable qui consiste à ajouter de chlore (Hypochlorite de sodium) à l'eau brute. Elle permet :

- L'oxydation des composés minéraux tels que l'ammoniaque, le manganèse
- L'oxydation de la micropollution organique
- L'élimination des goûts et des odeurs
- L'inhibition de la croissance algale en clarification
- L'amélioration de l'étape de coagulation floculation

III.3.3.2. Coagulation : Processus comportant en premier lieu la déstabilisation des colloïdes et en second lieu leur agrégation en petits floes.

III.3.3.3. Floculation : Permet l'agglomération des particules neutralisées par la coagulation, elle assurée dans un bassin où l'on maintient une agitation lente.

Dosage du coagulant et floculant :

Le dosage optimal du coagulant et du floculant est fonction des caractéristiques physicochimiques de l'eau brute notamment sa turbidité et sa couleur. Ce dosage est déterminé lors de l'essai de coagulation **par le test Jar-Test**.

Le coagulant utilisé : sulfate d'alumine

L'adsorption sur charbon actif : En traitement des eaux, on utilise presque exclusivement le charbon activé comme adsorbant toutes proportions gardées. C'est un matériau économique qui permet d'éliminer une grande quantité des polluants notamment les substances humiques (responsable de la couleur), les goûts et les odeurs. [3]

III.3.3.4. Décantation :

Deux décanteurs classiques circulaires équipés d'un système de raclage des boues. Leurs caractéristiques sont :

- Diamètre 40 m ;

- 1 Capacité : 3300 m³ ; Ponts racleurs.



Figure III.3 : Décanteur circulaire

III.3.3.5. Filtration : La station de filtration comprend quinze (15) filtres à sable assurant l'élimination des matières en suspension par un procédé de filtration gravitaire.



Figure III.4 : Filtre à sable.

III.3.3.6. Désinfection : Le but de la désinfection est d'éliminer tous micro-organismes pathogènes présents dans l'eau et maintenir le chlore résiduel dans les conduites afin d'empêcher le développement de maladies hydriques. [4]

Chloration : La phase finale du traitement consiste en une chloration au niveau de la chambre d'eau filtrée. Comme en pré-oxydation, le chlore est injecté sous forme d'eau chlorée

III.4. Méthodes d'analyses

III.4.1. Paramètres organoleptiques

III.4.1.1. La couleur

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances dissoutes, c'est-à-dire passant à travers un filtre de porosité égale à $0.45\ \mu\text{m}$. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparente sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité. [5]

Mesure de la Couleur

Le processus de mesure de la couleur de l'eau à l'aide d'un spectrophotomètre nécessite une étape d'étalonnage préalable pour garantir des résultats précis. [6]



Figure III.5 : Spectrophotomètre

III.4.1.2. La turbidité

Principe :

C'est une mesure de l'aspect trouble de l'eau provoqué par la présence de matières en suspension (argiles, limons, matières organiques, micro-organismes).

Appareillage :

Turbidimètre (HACH 2100N). Cuve stérile

Chapitre III : Matériels et méthodes

Mode opératoire :

- Remplir la cuve stérile avec l'eau à analyser ;
- Appuyer sur le bouton mesure ;
- Faire la lecture après la stabilisation du turbidimètre. [7]



Figure III.6 : Turbidimètre.

III.4.2. Paramètres physico-chimiques

III.4.2.1. Mesure du PH :

Principe :

Le pH ou potentiel d'hydrogène c'est l'un des paramètres les plus importants de la qualité de l'eau. Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. [8]

Appareillage :

Le pH se mesure avec un appareil appelé pH-mètre.



Figure III.7 : pH-mètre.

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.4.2.2. Mesure de Température :

Elle est mesurée à l'aide d'un pH- mètre

Le même mode opératoire de pH

Les résultats sont exprimés en °C

III.4.2.3. Mesure de la conductivité

Principe :

Mesure de la conductance électrique d'une colonne d'eau délimitée par deux électrodes de platine (Pt) (ou couvertes de noir de platine) maintenues parallèles

Appareillage

Elle est mesurée directement à l'aide d'un turbidimètre de marque HACH SL1000

Mode opératoire

Avant de commencer la mesure, il faut d'abord rincer l'électrode de l'appareil par l'eau distillée. Plonger l'électrode dans le récipient contenant l'eau à analyser en prenant soin que L'électrode soit complètement immergée ($\mu\text{S}/\text{cm}$). [7]



Figure III.8 : conductimètre

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.4.2.4. Mesure de l'Oxygène dissout

Principe :

La teneur en oxygène dissous des eaux est mesurée à l'aide d'une sonde munie d'une électrode sensible à cette molécule, elle est exprimée en milligramme par litre (mg/l). [9]



Figure III.9 :Oxymètre

III.4.2.5. Chlore résiduel

Principe

Le test de chlore est déterminé par la méthode du DPD (N, N-Diethyl-P Phenylenediamine). En présence de chlore libre le DPD donne un complexe rougeâtre. [7]

Mode opératoire

- Agiter l'eau à analyser ;
- Prendre un tube à essais, ajouter une quantité déterminée d'eau à analyser ;
- Ajouter un comprimé de DPD ;
- Comparer la couleur du tube avec celle du comparateur pour préciser le taux de chlore présent dans l'eau à analyser.



Figure III.10 : Mesure de chlore résiduel.

III.4.2.6. Mesure du résidu sec

Principe

Une certaine quantité d'eau est évaporée dans une capsule tarée. Le résidu desséché est ensuite pesé. [10]

Mode opératoire

- Tarer une capsule préalablement lavée ;
- Rincer avec de l'eau distillée et dessécher ;
- Prélever 200 ml d'eau à analyser ;
- Porter à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures ;
- Laisser refroidir pendant 1/4 heure au dessiccateur ;
- Peser immédiatement. [11]



Figure III.11 : Dessiccateur.

III.4.3. Paramètres spectro-photométriques

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.4.3.1. Mesure de l'aluminium

Principe

Les ions d'aluminium se combinent avec le rouge d'alizarine pour former un complexe jaune rouge qu'on peut mesurer. [12]

Mode opératoire

- Prendre 50 ml d'eau à analyser ;
- Ajouter 0.5 ml thiosulfate de sodium ;
- Ajouter 1 ml d'acide ascorbique 10g/l (préparation 0.1g dans 10ml eau distillée) ;
- Ajouter 1 ml d'acide sulfurique ;
- Ajouter 10 ml de la solution tampon ;
- Ajouter 5 ml d'eriochromecyanine ;
- Attendre 10 min développement de la couleur.

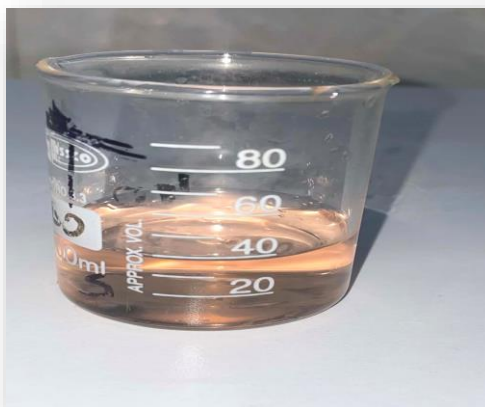


Figure III.12 : Dosage de l'aluminium

III.4.3.2. Dosage de L'Ammonium (NH_4^+)

Principe

En présence d'un catalyseur, le nitroprussiate de sodium, l'ion ammonium réagit avec le chlore et le salicylate de sodium en milieu basique et donne une coloration dite bleu d'indophénol susceptible de dosage colorimétrique. [6]

Mode opératoire

- Prendre 40 ml d'eau à analyser ;

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Ajouter 4 ml du réactif I ;
- Ajouter 4 ml du réactif II et homogénéiser ;
- Après au moins 60 min, attendre le développement de la couleur ;
- Faire la lecture par la méthode « ammonium 10 » (la cuvette de 10 cm) ;

Appareillages

Appareil Spectrophotomètre UV-Visible



Figure III.13 : Dosage de l'ammonium.

III.4.3.3. Dosage des ions nitrites (NO_2^-)

Principe :

Les ions nitrites réagissent en milieu acide ($\text{pH} = 1,9$) avec les sulfamides en formant le sel de diazonium (diazotation) qui forme avec le N-(1-naphtyl) -éthylènediamine-dichlorohydraté un colorant azoïque rouge. [13]

Mode opératoire

- Prendre 50 ml d'eau à analyser ;
- Ajouter 1 ml du réactif mixte ;
- Attendre 20 min développement de la couleur.



Figure III.14 : Résultat de la recherche des Nitrites (NO_2^-).

III.4.3.4. Dosage des nitrates (NO_3^-)

Principe :

En présence de salicylate de sodium les nitrates donnent du para-nitro-salicylate de sodium

Coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique par spectrophotomètre. [12]

Mode opératoire

- Prendre 5 ml d'eau à analyser ;
- Ajouter 2 gouttes de NaOH à 30% ;
- Ajouter 0.5 ml de salicylate de Na ;
- Evaporer à l'étuve 75-88°C ; laisser refroidir.
- Reprendre le résidu avec 1 ml d' H_2SO_4 repos 10 min ;
- Ajouter 7.5 ml d'eau distillée ;
- Ajouter 7.5 ml de tartrate double.

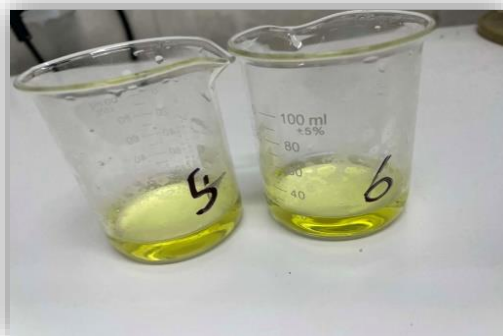


Figure III.15 : Dosage des nitrates.

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.4.3.5. Dosage des Sulfates (SO_4^{2-})

Principe :

Les ions sulfates sont précipités et pesés à l'état de sulfate de baryum. En présence de BaCl_2 . [10]

Mode opératoire

- Prendre 10 ml d'eau à analyser puis compléter à 50 ml avec H_2O distillée ;
- Ajouter 2.5 ml de la solution stabilisante ;
- Ajouter 1 ml de chlorure de baryum ;
- Agiter énergiquement pendant 1 min.

NB : la concentration de SO_4 , est égale la valeur lue x 5

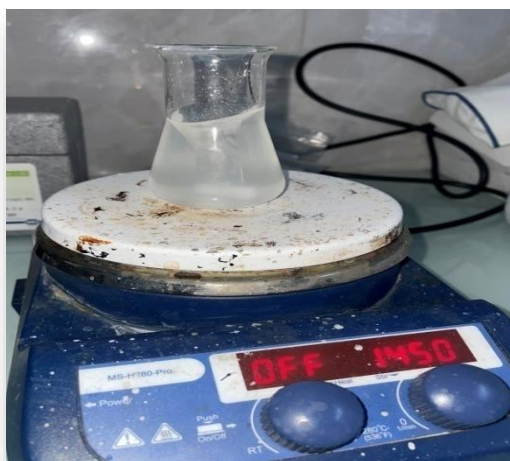


Figure III.16 : Dosage de sulfate

III.4.3.6. Détermination du fer (méthode Powder Pillow Fer)

- Allumez le spectrophotomètre NANOCOLOR Advance ;
- Sélectionnez la méthode correspondant au Test 7-27 (fer) ;
- Rincer plusieurs fois la cuve de réaction avec l'échantillon d'eau (la valeur pH de l'échantillon doit se situer entre pH 2 et 13) ;

Blanc (en option) :

- Remplir une cuve ronde avec un échantillon de 10 ml ;
- Nettoyer l'extérieur de la cuve ronde ;
- Placer la cuve ronde dans le photomètre et procéder à la mesure du point zéro.

Echantillon :

- Remplir une autre cuve ronde avec un échantillon de 10 ml ;
- Ajouter le contenu d'un Powder Pillow Fer ;
- Fermer la cuve ronde et secouer énergiquement ;
- Nettoyer l'extérieur de la cuve ronde ;
- Temps de réaction : attendre 2 min ;
- Mesurer. [14]



Figure III.17 : Dosage de fer.

III.4.3.7. Détermination du phosphore (méthode par Powder Pillow Phosphate)

Mode opératoire

- Allumez le spectrophotomètre NANOCOLOR Advance et sélectionnez la méthode correspondant au Test 7-28 (Phosphate) ;
- Rincer plusieurs fois la cuve de réaction avec l'échantillon d'eau (la valeur pH de l'échantillon doit se situer entre pH 2 et 11) ;

Blanc (en option) :

- Remplir une cuve de réaction avec un échantillon de 10 ml ;
- Nettoyer l'extérieur de la cuve de réaction ;
- Placer la cuve de réaction dans le photomètre et procéder à la mesure du point zéro.

Echantillon :

- Remplir une autre cuve de réaction avec un échantillon de 10 ml ;

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Ajouter le contenu d'un Powder Pillow Phosphate ;
- Fermer immédiatement la cuve de réaction et l'agiter pendant 30 s. Attendre 2 min ;
- Nettoyer l'extérieur de la cuve de réaction ;
- Mesurer. [15]



Figure III.18 : Dosage de phosphore

III.4.3.8. Détermination du manganèse

Mode opératoire

Dans une fiole jaugée de 25 ml :

- Mettre 20 ml d'échantillon à analyser (son pH doit être compris entre 2 et 10) ;
- Ajouter 0,5 ml de R1, mélanger, ajouter 1 ml de R2, mélanger, attendre 5 minutes ;
- Ajouter lentement le long de la paroi 2 ml de R3 afin de créer une couche sous la solution.

Dans une fiole jaugée de 25 ml :

- Mettre 20 ml d'eau distillée, ajouter 1ml de R2, mélanger, ajouter 0,5 ml de R1, mélanger, attendre 5 minutes ;
- Ajouter lentement le long de la paroi 2 ml de R3 afin de créer une couche sous la solution.
- Ajouter de l'eau distillée à l'échantillon et au blanc de manière à obtenir un volume de 25 ml et mélanger. Après 1 min ;
- Transvaser dans les cuves ;
- Nettoyer l'extérieur des cuves ;
- Allumez le spectrophotomètre NANOCOLOR Advance et sélectionnez la méthode correspondant au Test 1-26 (Manganèse) ;
- Mesurer.



Figure III.19 : Dosage du manganèse.

III.4.3.9. Dosage de sodium et de potassium par photométrie de la flamme

Principe

La nébulisation d'un échantillon dans une flamme excite les atomes, qui émettent ensuite de l'énergie sous forme de photons en revenant à leur état initial. Ces photons produisent une lumière caractéristique de chaque élément, filtrée puis mesurée par un détecteur. L'intensité lumineuse obtenue est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon, à condition que celui-ci soit correctement nébulisé pour permettre une évaporation rapide de l'eau. [16]

Matériels utilisés

- Appareil spectrophotomètre à flamme (JENWAY).
- Bouteille de gaz propane.
- Une cuvette remplie de l'eau distillée.

Préparation des étalons

- Solution fille de sodium (Na^+) à 10 mg/l de la solution mère de (NaCl) à 1000 mg/l dans 100ml d'eau distillée (2.54 mg de (NaCl) 1000 cc d' H_2O distillée : solution mère de Na^+ à 1g/l).
- Solution fille de potassium (K^+) à 10 mg/l : 1 ml de la solution mère de (KCl) à 1 g/l dans

Chapitre III : Matériels et méthodes

100ml d'eau distillée. (1.91g de (K Cl) 1000 cc d'H₂O distillée : solution mère de (K⁺) à 1g/l). [17]

Mode opératoire

- Allumer le spectrophotomètre à flamme à l'aide de bouton power ;
- Ouvrir la bouteille de gaz ;
- Régler la concentration à 10 g/l dans le spectrophotomètre à flamme avec la solution de potassium/sodium ;
- Déterminer à l'aide du bouton de filtre select type d'élément chimique recherché Passer de l'eau à analyser jusqu'à ce que la valeur affichée dans l'écran soit stable ;
- Avant chaque mesure mettre le blanc.



Figure III.20 : Spectrophotomètre à flamme

III.4.4. Paramètres volumétriques

III.4.4.1. La dureté totale :

Principe :

Les alcalinoterreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe du type chélate par le sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique (EDTA) à pH 10. La disparition des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le virage d'un indicateur spécifique ; le noir ériochrome. En milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation du magnésium, la méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium. [18]

Mode opératoire :

- On introduit 50 ml d'eau à analyser dans une fiole conique de 250 ml ;
- On ajoute 2 ml de solution tampon et deux gouttes de solution de noir ériochrome T (NET) ;

Chapitre III : Matériels et méthodes

- La solution se colore en violet, le pH doit être de 10 ;
- En maintenant une agitation ;
- On verse la solution d'EDTA rapidement au début puis goutte à goutte lorsque la solution commence à virer du violet au bleu ;
- On vérifie que la coloration ne change plus par l'addition d'une goutte supplémentaire d'EDTA. Noter le volume versé ;



Figure III.21 : Dosage de la dureté totale

III.4.4.2. La dureté calcique :

Principe :

Le principe est identique à celui de la méthode titrimétrique décrite pour la dureté totale. Toutefois, comme le dosage en milieu très basique, pour les valeurs de $\text{pH} > 10$, le magnésium précipite sous forme d'hydroxyde et n'intervient pas. Par ailleurs, l'indicateur choisi, rouge de Murexide, ne se combine qu'avec le calcium pour former un complexe rouge. [18]

Mode opératoire :

- On introduit 100 ml de l'échantillon préparé dans une fiole conique de 250 ml ;
- On ajoute 2ml de solution d'hydroxyde de sodium et environ 0,2 g de l'indicateur Murexide. La solution se colore en rose ;
- On mélange et on dose immédiatement ;
- On ajoute la solution d'EDTA tout en continuant d'agiter. Le virage est atteint lorsque la couleur devient violette.



Figure III.22: Dosage de la dureté calcique.

Expression de résultats :

- $\text{mg/l Ca}^{2+} = V_1 \times 2 F$
- $V_2 : \text{Ca}^{2+} \text{ Mg}^{2+}$

$$\text{TH} = V_2 \times 2F \quad (1)$$

- $\text{Mg}^{2+} \text{ mg/l} = (V_2 - V_1) \times F \times 4,8$

F : - Prendre 50 ml de la solution mère à 100 mg/l Ca^{2+} .

- Ajouter 2ml NaOH, puis l'IC (Murexide)

- Titrer par l'EDTA jusqu'au virage (violet). (V_p)

$$F = \frac{V_T}{V_p} = \frac{12,5}{V_p} \quad (2)$$

III.4.4.3. Le chlorure :

Méthode de Mohr

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrates d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent. [13]

Mode opératoire :

- Prendre 5 ml d'eau à analyser ;

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Ajouter 2 gouttes de chromate de potassium (coloration jaunâtre) ;
- Titrer avec AgNO_3 à 0,01 N jusqu'à coloration brunâtre.



Figure III.23 : Dosage des chlorures.

Expression des résultats :

$$\text{mg/l Cl}^- = \frac{V_{\text{AgNO}_3} \times N_{\text{AgNO}_3} \times M_{\text{Cl}} \times 1000}{\text{PE}} = \frac{V_{\text{AgNO}_3} \times 0,01 \times 35,5 \times F \times 1000}{5}$$

$$\text{mg/l Cl}^- = V_{\text{AgNO}_3} \times 71 \times F \quad (3)$$

V_{AgNO_3} : Volume d' AgNO_3

N_{AgNO_3} : Normalité d' AgNO_3

M_{Cl} : La masse molaire des chlorures.

F : facteur de correction du titre d' AgNO_3 .

PE : prise d'essai.

III.4.4.4 : La matière organique :

Principe :

Mesure en milieu acide de la quantité d'oxygène utilisée pour la réduction de permanganate de potassium par les matières oxydables contenues dans une eau. [5]

Mode opératoire :

- Prendre 100ml d'eau à analyser ;
- Ajouter 5ml H_2SO_4 dilué et porter à l'ébullition pendant 1 min ;

Chapitre III : Matériels et méthodes

- Ajouter 15ml de KMnO_4 à 0,01N avec 10 min d'ébullition régulière et douce, coloration violette ;
- Ajouter 15ml d'acide oxalique à 0,01N, disparition de la couleur violette ;
- Titrer à chaud avec KMnO_4 à 0,01N jusqu'à coloration rose clair qui persiste 15 à 20 secondes.

N.B : Un essai à blanc est nécessaire.



Figure III.24 : Dosage de la matière organique.

Expression de résultats : On indique les résultats comme oxydabilité (consommation de permanganate de potassium) en mg de KMnO_4 /l, aussi en mg d' O_2 /l.

III.4.4.5. Titre Alcalimétrique Complet (TAC) et (HCO_3^-)

Principe

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur colore. [19]

Chapitre III : Matériels et méthodes

Mode opératoire

- Prélever 50 ml d'eau à analyser dans une fiole conique ;
- Ajouter 2 gouttes de solution de vert de bromocrésol et de rouge de méthyle ;
- Titrer avec l'acide chlorhydrique ou sulfurique 0,02 N, jusqu'à disparition de la coloration bleu verdâtre et apparition de la couleur vert clair (pH 4,5).



Figure III.25 : Dosage de TAC.

III.4.5. Paramètres de pollution organique

III.4.5.1. Demande Chimique En Oxygène (DCO)

Mode opératoire :

- Introduire 10 ml de l'échantillon (eau brute ou eau distillée pour le blanc) dans le tube du réacteur ;
- Ajouter 5 ml de solution de dichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$;
- Ajouter quelques régulateurs de thermorégulation (billes de verre) dans le tube et agiter doucement ;
- Ajouter 15 ml d'acide sulfurique-sulfate d'argent ($H_2SO_4-Ag_2SO_4$) ;
- Relier le tube au réfrigérant de l'appareil et porter à reflux à une température de 150 °C pendant 2 heures, puis démarrer l'appareil ;
- Refroidir dans l'eau avec T-60°C ;
- Rincer le réfrigérant avec l'eau distillé et compléter le contenu du tube à 75 ml ;
- Ajouter 2 ou 3 gouttes d'indicateur coloré (ferroïen) ;
- Titre avec sulfate de fer (II) et d'ammonium, (Sel de mohre), jusqu'au virage de la couleur du bleu-vert au rouge-brun, puis noter le volume de virage obtenu.

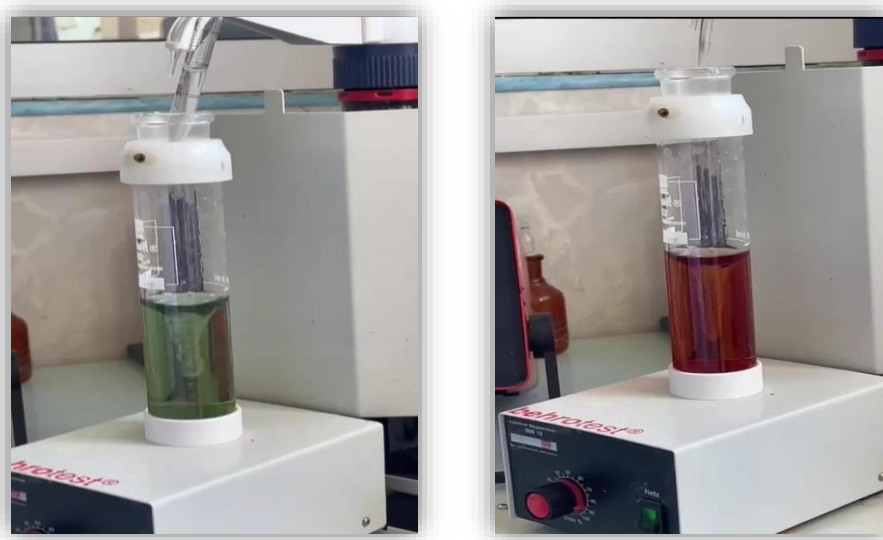


Figure III.26: Dosage de la DCO.

III.4.5.2. Azote kjeldahl :

Les étapes :

1. Minéralisation:

Mode opératoire :

- Introduire 100 ml d'échantillon (eau brute, eau traitée ou eau distillée pour le blanc) dans le matras (ballon) de Kjeldahl ;
- Ajouter 5 ml d' H_2SO_4 concentré ;
- Ajouter 1 g catalyseur ($49.75 \text{ g } \text{K}_2\text{SO}_4 + 0.25 \text{ g } \text{sélénium}$), puis chauffer.

2. Distillation :

- Dans l'erenmeyer ajouter : 20 ml acide borique H_3BO_3 (4 g/100ml H_2O), 2 gouttes indicateur (1 g + 10ml éthanol) ;
- La solution (1) placée dans l'appareil en parallèle d'erenmeyer. Mettre l'appareil en marche.

3. Dosage :

- Récupérer environ 50 ml de distillat au niveau du condenseur ;
- Titrer le contenu de l'erenmeyer de réception avec de l' H_2SO_4 à 0,02 N jusqu'au virage de la couleur (du vert au rose clair).

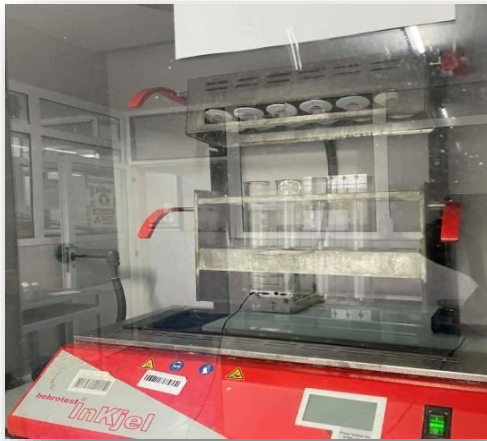


Figure III. 27: Appareille de l'azote kajeldah.

III.4.5.3. Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

Principe :

L'échantillon d'eau, introduit dans une enceinte thermostatée est mis à incuber en présence d'air. Les micro-organismes présents consomment l'oxygène dissous qui est remplacé en permanence par l'oxygène en provenance du volume d'air situé au-dessus de l'échantillon. Le dioxyde de carbone (CO₂) formé est piégé par l'hydroxyde de potassium. Cette diminution en oxygène crée une dépression qui est enregistrée par une élévation du niveau de mercure.

Mode opératoire :

- Prendre une prise d'essai ;
- Mettre l'échantillon dans une bouteille de DBO propre ;
- Mettre dans la bouteille un aimant magnétique ;
- Mettre la capsule qui contient de la soude (NaOH) ou la potasse (KOH) dans la bouteille ;
- Mettre cette dernière dans le DBO mètre ;
- Le bouchon doit être fermé à moitié pendant 15 min ;
- Une fois le quart d'heure achevé serrer le bouchon et la cuvette de mercure ;
- Régler le niveau de la règle à zéro (0) et faire la lecture du premier jour après 24 heures et ainsi de suite jusqu'au 5ème jour.



Figure III.28 : Mesure de la DBO₅

III.4.6. Paramètres de traitement

III.4.6.1. Break point

Principe de la méthode :

Dans une série de flacons contenant un même volume d'eau à analyser, on ajoute des concentrations croissantes de chlore. La demande en chlore de l'eau est donnée par le premier flacon dans lequel on décèle la présence de chlore libre après un temps de contact déterminé (généralement 1 à 2 heures.). [20]



Figure III.29 : Break point

III.4.6.2. Détermination de la dose de coagulant et floculant

Mode opératoire

- Remplir les béchers gradués avec de l'eau brute à traiter
- Détermination de la dose de coagulant - essayer doses croissantes jusqu'à optimum
- Détermination du pH optimum - refaire essais en imposant la dose de coagulant pour différent pH
- Détermination de la dose floculant - refaire essais en imposant les 2 paramètres ci-dessus et en ajoutant des doses croissantes de polymère

Séquence :

Les temps et l'agitation doivent refléter les paramètres de l'installation réelle

1. Ajouter coagulant : Agitez pendant 3 minutes à ± 120 tours/min
2. corriger le pH
3. Ajouter floculant : Puis agiter pendant 15 minutes à ± 38 tours/min
4. Laissez décanter pendant $\frac{1}{4}$ d'heure

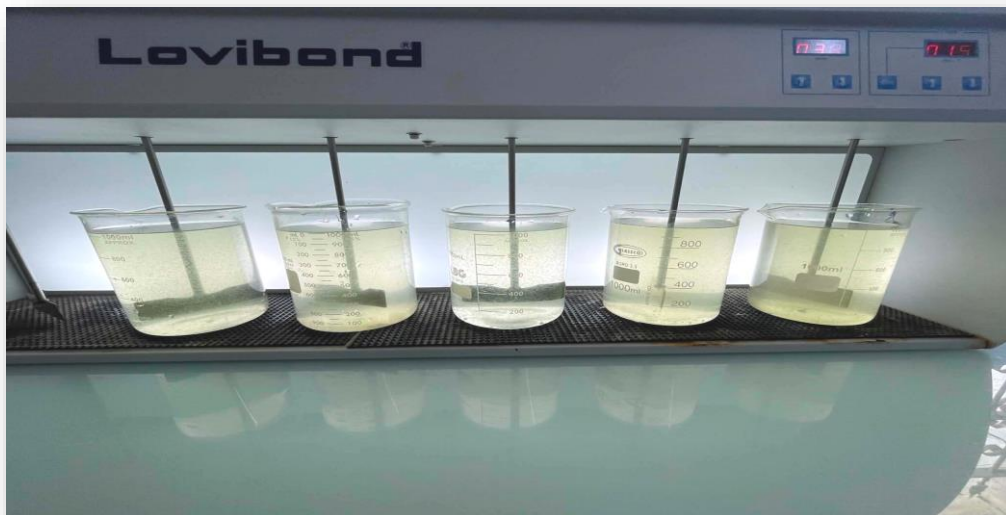


Figure III.30 : Jar test.

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.4.7. Paramètres bactériologiques

III.4.7.1. Recherche des coliformes totaux :

Sous le terme de « coliformes » est regroupé un certain nombre d'espèces bactériennes. La définition suivante a été adoptée par l'organisation internationale de standardisation (ISO). Les coliformes sont des bacilles à Gram négatif, non sporulés, oxydase, aérobies ou anaérobies capables de se multiplier en présence de sels biliaries et capable de fermenter le lactose, avec une production d'acide et de gaz en 48h à une température de 35-37 °C. [11,21]

1. Méthode liquide :

- a. **Test de présomption** : réservé à la recherche des coliformes,
- b. **Test de confirmation** : réservé à la recherche des coliformes thermotolérants et *Escherichia Coli*.
- a. **Test de présomption**

A partir de l'eau à analyser, porter aseptiquement :

- 30 ml dans un flacon contenant 30 ml de milieu BCPL D/C muni d'une cloche de Durham.
- 3 fois 10 ml dans 3 tubes contenant 10 ml de milieu BCPL D/C muni d'une cloche de Durham.
- 3 fois 10 ml dans 3 tubes contenant 10 ml de milieu BCPL S/C muni d'une cloche de Durham.
- Chasser l'air éventuellement présent dans les cloches de Durham et bien mélanger le milieu et l'inoculum.
- L'incubation se fait à 37 °C pendant 24 à 48 heures.

Lecture

Seront considérés comme positifs, les tubes présentant à la fois :

- Un dégagement de gaz (supérieur au 1/10 de la cloche),
- Un trouble microbien accompagné d'un virage du milieu au jaune (ce qui constitue le témoin de la fermentation du lactose présent dans le milieu).

La lecture finale se fait selon les prescriptions de la table du NPP dite de Mac Grady qui figure en annexe 1.



Figure III. 31 : Recherche de coliformes totaux en milieu liquide.

b. Test de confirmation

Ce test est basé sur la recherche de Coliformes thermotolérants parmi lesquels on redoute surtout la présence d'*Escherichia coli*.

Les coliformes fécaux : sont des bactéries du groupe des coliformes (famille des Enterobacteriaceae), qui, après incubation à 44° C, fermentent le lactose avec dégagement de gaz et produisent de l'indole aux dépens du tryptophane de la peptone. [22]

Escherichia coli : Le terme « E.coli » correspond à des coliformes thermotolérants qui produisent de l'indole à partir du tryptophane et ont les caractères biochimiques propres à cette espèce. [23]

Le test de confirmation ou test de Mac Kenzi est basé sur la recherche de coliformes Fécaux parmi lesquels on redoute surtout la présence d'*Escherichia Coli*. Les tubes de BCPL Positifs, après l'agitation, prélever de chacun d'eux quelques gouttes à l'aide d'une pipette Pasteur pour faire le repiquage dans un tube contenant le milieu Schubert muni d'une cloche. Chassez le gaz présent éventuellement dans les cloches et bien mélanger le milieu.

L'incubation se fait à 44°C pendant 24 h, seront considérés comme positif ; les tubes Présentant à la fois :

- Un dégagement du gaz (supérieur au 1/10 de la hauteur de la cloche).
- Un anneau rouge en surface, témoin de la production d'indole par *Escherichia Coli* après adjonction de 2 à 3 gouttes du réactif de Kovacs. [24]

Chapitre III : Matériels et méthodes

2. Méthode solide :

Pour la recherche et le dénombrement des coliformes totaux et fécaux, nous avons utilisé la méthode par ensemencement en milieu solide en gélose lactosée au Tergitol 7 et TTC comme milieu de culture, (test présomptif sur milieu TTC, et pour test confirmatif sur TSA...).

Mode opératoire :

1ère étape : Test présomptif :

- On prend quatre boîtes de Pétri stériles et on note sur chaque boîte le nom d'échantillon, la date et la température d'incubation.
- Près d'un bec benzène, on prélève 1 ml d'eau à analyser et on ensemence dans chaque boîte.
- On fait couler la gélose préalablement fondue et refroidie à 45 °C.
- On agite doucement par un mouvement circulaire pour assurer un mélange homogène.
- Les boîtes des coliformes totaux, sont incubées à 37°C pendant 48h.

Lecture : Après incubation, sont considérées comme positives, les boîtes ayant

- Des colonies bombées lisses de couleur jaune orangé avec un halo jaune.

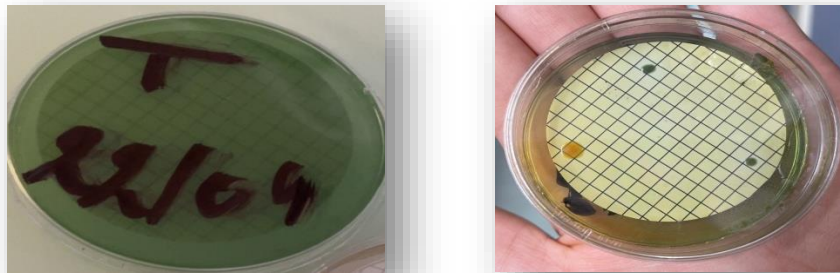


Figure III.32: Recherche de coliformes totaux et fécaux en milieu solide

2ème étape : Test confirmatif de la présence ou l'absence d'E. Coli.

- A partir de chaque boîte positive on repique 2 à 3 gouttes par une anse bouclée ou une pipette pasteur dans une boîte de gélose TSA.
- On incube à 44 °C pendant 24 heures, les boîtes considérées comme positifs seront ceux qui présentent à la fois un développement bactérien avec une coloration jaune orangé.

Chapitre III : Matériels et méthodes

- On compte les colonies en marquant chaque colonie sur le fond de la boîte avec un marqueur indélébile. [25]

Lecture

- Des colonies bombées lisses de couleur blanche.

III.4.7.2. Recherche des streptocoques :

Les streptocoques sont des bactéries à gram positif qui se présentent sous forme de coques en courtes chaînes. [26]

Test présumptif :

Méthode par filtration :

Le dénombrement est basé sur une filtration d'un 100ml d'eau à analyser à travers une membrane filtrante en cellulose de porosité 0.45 μm et de 47 mm de diamètre, la membrane est placée sur un milieu gélosé spécifique et incubé à 37°C pendant 24H (milieu de Slanetz et Bartley).



Figure III.33 : Recherche des streptocoques en milieu solide (par filtration).

Méthode par détermination du NPP : Les Streptocoques fécaux sont dénombrés en milieu liquide à l'aide d'un bouillon de culture (milieu de Rothe). A partir de l'eau à analyser bien homogénéiser, ensemençer :

- 3 fois 10ml dans 3 tubes contenant 10 ml de milieu Roth D/C
- 3 fois 1ml dans 3 tubes contenant 10 ml de milieu Roth S/C
- 3 fois 0.1ml dans 3 tubes contenant 10 ml de milieu Roth S/C
- Incuber les tubes à 37°C pendant 24 à 48 heures.

Chapitre III : Matériels et méthodes

Lecture

Les tubes présentant un trouble microbien pendant cette période seront considérés comme susceptibles de contenir un streptocoque fécal, ils seront obligatoirement soumis au test confirmatif. Noter le nombre de tubes positifs dans chaque série.

Test confirmatif :

Sur le milieu solide : Après l'incubation, sur le milieu Slanetz et Bartley, dénombrer les colonies petites à couleur roses, marron ou rouges. Repiquer à l'aide d'une l'anse de platine stérile les colonies sur le milieu de confirmation (milieu EVA Litsky ou milieu BEA) et incuber à 37°C pendant 24 heures. Sont considérés comme positifs les tubes présentent un trouble du couleur et formation d'une pastille blanchâtre au fond des tubes, ces deux observations confirment la présence des streptocoques fécaux.

Sur le milieu liquide : Après l'incubation, sur le milieu Rothe, dénombrer les tubes positifs (trouble de la couleur) par la méthode NPP. Repiquer 0.1ml sur le milieu de confirmation et incuber à 37°C pendant 24 heures. Sont considérés comme positifs les tubes présentent un trouble du couleur et formation d'une pastille blanchâtre au fond des tubes, ces deux observations confirment la présence des streptocoques fécaux. [27]



Figure III.34 : Recherche des streptocoques en milieu liquide

III.4.7.3. Recherche des spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices :

Les bactéries du genre *Clostridium* sont des bacilles à Gram positif, anaérobies strictes, mobiles sporulant, catalase négative. [28]

1. Méthode filtration sur membrane :

Mode opératoire :

- Avant de procéder à l'essai, l'échantillon à analyser doit être chauffé dans un bain marie à $75^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ pendant 15 mn à partir du moment où cette température a été atteinte ;
- Refroidir immédiatement sous l'eau du robinet jusqu'à température ambiante ;
- Filtration de 100 ml sur une membrane de $0,22\ \mu\text{m}$;
- Après filtration, enlever la membrane avec une pince stérile et la placer, face supérieur tournée vers le bas dans le fond d'une boîte de Pétri en s'assurant qu'il ne reste pas de bulles d'air sous la membrane ;
- Ensuite verser soigneusement le milieu de culture liquéfié avec additifs, jusqu'au rebord de la boîte de Pétri ;
- Incuber à $37 \pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant $22 \pm 2\ \text{h}$ (1^{ère} lecture) et $44 \pm 4\ \text{h}$ (2^{ème} lecture).

Lecture

- Une première lecture (dénombrement des colonies) après $22 \pm 2\ \text{h}$ d'incubation doit être impérativement faite, pour éviter un développement trop important de bactéries. En effet, en présence de nombreuses colonies, une diffusion des halos peut conduire à une coloration noire uniforme de la membrane, rendant le dénombrement impossible en 48h.
- Toute colonie noire entourée d'un halo noir est considérée comme résultant d'une spore de bactérie anaérobie sulfito-réductrice.

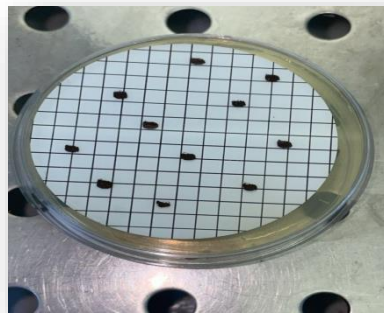


Figure III.35 : Recherche des spores en milieu solide

Chapitre III : Matériels et méthodes

2. Méthode NPP :

Les anaérobies sulfitoréducteurs (ASR) se développant en 24 à 48 heures sur une gélose viande foie (VF) en donnant des colonies typiques réduisant le sulfite de sodium (Na_2SO_3) qui se trouve dans le milieu, en sulfure qui en présence de Fe^{2+} donne FeS (sulfure de fer) de couleur noire.

Mode opératoire :

A partir de l'eau à analyser :

- Prendre à l'aide d'une pipette graduée stérile 25 ml d'eau dans des tubes stériles, qui sera par la suite soumis à un chauffage de l'ordre de 80°C pendant 10 minutes, dans le but de détruire toutes les formes végétatives des ASR éventuellement présentes ;
- Après chauffage, refroidir immédiatement le tube en question, sous l'eau de robinet ;
- Répartir ensuite le contenu de ce tube, dans 4 tubes différents et stériles, à raison de 5 ml par tube ;
- Ajouter environ 18 à 20 ml de gélose Viande de Foie, fondue puis refroidie à $45 \pm 1^\circ\text{C}$, additionnée de leurs additifs spécifiques. (Alune de fer et Sulfite de sodium) ;
- Mélanger doucement le milieu et l'inoculum en évitant d'introduire des bulles d'air et de l'oxygène ;
- Laisser solidifier sur paillasse pendant 30 minutes environ, puis incubé à $36 \pm 1^\circ\text{C}$, pendant 24 à 48 heures.

Lecture

- Considérer comme résultant d'une spore de bactérie anaérobie sulfito-réductrice toute colonie noire entourée d'un halo noir.
- La première lecture doit absolument être faite à 16 heures. Il est donc impératif de repérer et de dénombrer toutes les colonies noires poussant en masse et de rapporter le total des colonies à 20 ml d'eau à analyser. [29]

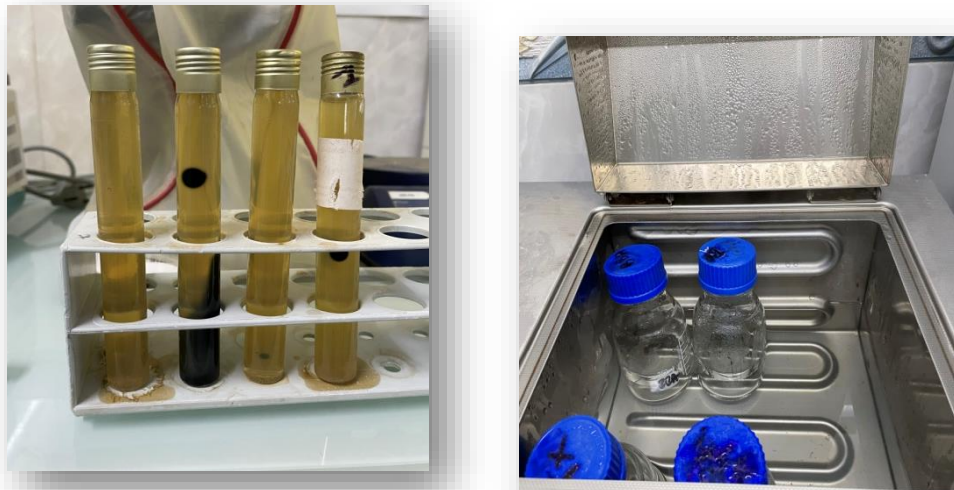


Figure III.36 : Recherche des spores en milieu liquide.

III.4.7.4. Recherche et dénombrement des germes totaux

Les germes totaux ; par définition selon la norme AFNOR sont des microorganismes revivifiables à 37°C (Bactéries, moisissures, levures).[30]

Mode opératoire :

- Le milieu gélosé TGEA est fondu dans un bain marie à 100°C puis refroidi à environ 40°C ;
- Verser 1ml d'eau à analyser dans deux boîtes de pétri ;
- Ajouter 15 ml de TGEA fondu et refroidi à environ 40°C ;
- Mélanger avec précaution par rotation ;
- Laisser la gélose se solidifier ;
- Incuber une boîte à 22°C pendant 72h et la deuxième à 37°C pendant 24h. [31]

Lecture : Des colonies blanches

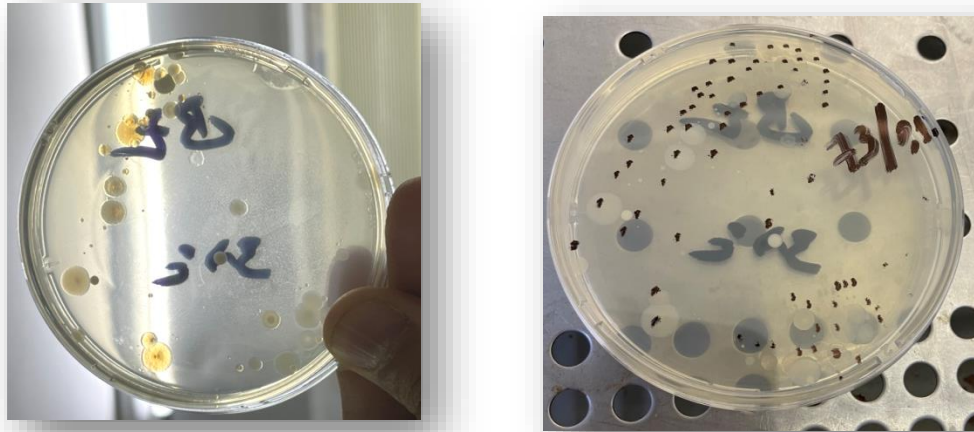


Figure III.37 : Recherche des germes en milieu solide.

Chapitre III : Matériels et méthodes

Références chapitre III :

- [1] Mebarkia A., Etudes des caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface, cas du barrage de Ain zada wilaya de bordj Bou-Arreidj (Nord-est algérien), mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2011.
- [2] Google Maps, Localisation de barrage Ain Zada, BBA., image satellite, consulté le 21/03/2026 <https://maps.app.goo.gl/kieqV36cJD6fkjRo9>
- [3] Harrat N., Elimination de la matière organique naturelle dans une filière conventionnelle de potabilisation d'eaux de surface, thèse doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.
- [4] Belalia H., Bouchaour K., Maîtrise des techniques de dessalement de l'eau de mer, mémoire de D.E.U.A, Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral, Alger, 2011.
- [5] Rodier J., Legube B., Merlet N., L'analyse de l'eau : Contrôle de la qualité des eaux naturelles, des eaux résiduaires et des eaux de consommation, 9^e éd., Paris, Dunod, 2009.
- [6] Gouadria A., Zaoui C., Etude de la qualité physico-chimique de l'eau traitée par la technique de l'ozonation du barrage de Ain Zada - Wilaya de Bordj Bou Arreridj, mémoire de master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, B.B.A., 2024.
- [7] Rodier J., L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8e éd. Paris, Dunod, 2005.
- [8] Ladjel S., Contrôle des paramètres physico-chimiques et bactériologiques d'une eau de consommation, Les Cahiers Techniques du Stage T7, Centre de Formation aux Métiers de l'Eau, Tizi-Ouzou, Algérienne des Eaux (ADE), 2009
- [9] Gaaloul A., Hamani R., Makhoukh L., Étude physico-chimique et microbiologique de l'eau de surface « Barrage Keddara », mémoire de master, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2025.
- [10] Laalaoui R., Aloull F., Évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau traitée du barrage de Aïn Zada, wilaya de Bordj Bou Arréridj, mémoire de master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, 2022.

Chapitre III : Matériels et méthodes

[11] Benachour A., Aguenini Z., Contrôle de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de deux sources « Yema Bahria » et « Oued Bourrebo » (Chr  a), mémoire de master, Université Blida 1, 2020.

[12] Chouafa N., Munjovo G., Analyse de la qualité de l'eau potable distribuée à Guelma, mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2022.

[13] Rodier J., L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer., 7e   d., Paris, Dunod, 1984.

[14] MACHEREY-NAGEL. *VISOCOLOR® Powder Pillows Iron (REF 936227)* : réactif pour la détermination photométrique du fer par la méthode à la 1,10-phénanthroline. Düren, Allemagne : MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG, Manuel d'instructions, révision 2024

<https://www.mn-net.com/media/pdf/85/38/83/Instruction-936227-Photometric-test-VISOCOLOR-Powder-Pillows-Iron.pdf> consulter le 10/05/2026

[15] MACHEREY-NAGEL. *VISOCOLOR® Powder Pillows Phosphate, REF 936228* : réactif pour la détermination photométrique des phosphates. Düren (Allemagne) : MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG, 2024.

<https://www.mn-net.com/media/pdf/7f/6e/21/Instruction-936228-Photometric-test-VISOCOLOR-Powder-Pillows-Phosphat.pdf> consulter le 10/05/2026

[16] Lazazi K., Suivi des paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'eau potable depuis l'ouvrage hydraulique (réservoir, château d'eau) jusqu'au consommateur : cas de la wilaya de Boumerdes, mémoire de master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2023.

[17] Bekhiche W., Cheikh N., Analyse physico-chimiques et bactériologiques des eaux de la nappe du plateau de Mostaganem Ouest (Nord-ouest Algérie), mémoire de master, Université Amar Telidji, Laghouat, 2022.

[18] Ayad W., Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines : cas des puits de la région d'El-Harrouche (wilaya de Skikda), thèse doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.

[19] Bechaa H., Liacha B., Salah M., évaluation de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux du barrage de Bouhamdane, wilaya de Guelma, mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2022.

Chapitre III : Matériels et méthodes

[20] CIDF L., des Eaux. (2000), CIDF Centre International De Formation. Principes généraux de traitement des eaux, Lyonnaise des Eaux, 2000.

[21] Sayad L., Le pouvoir auto-épurateur de l'Oued Seybouse sur les rejets de la laiterie de l'Edough (Annaba-Algérie) et les objectifs environnementaux des rejets, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.

[22] Mazieres J., Richard B., Maieres S., Une méthode de recherche rapide des coliformes fécaux dans les eaux de mer et les coquillages. Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes, vol. 44, n°3, 1980.

[23] Rodier J., Bazin C., Brontin J., P., Chambon P., Champsaur H., Rodier L., L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, Dunod, 8ème édition, Paris, 1996.

[24] Selaimia N., Boukerche M., Nabti R., Evaluation de la qualité microbiologique de l'eau potable (eau de robinet) et l'eau de quatre sources naturelles dans la région de Guelma, mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2023.

https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/15278/1/SELAIMIA_NORA_F4.pdf

[25] Abdelli A., Bouziri F., Contribution à l'évaluation qualitative des eaux de sources de la région de Tlemcen, mémoire de master, Université de Tlemcen, 2020.

<https://dspace.univ-tlemcen.dz/server/api/core/bitstreams/ff0e2b26-8894-45c5-8dbf-f9fabb233b85/content>

[26] Bouzenia D., Diaf M., Suivi de la qualité microbiologique et physicochimique des eaux de baignade. Cas des plages : R'MILA, EL KETTANI et LA FAYETTE, mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'aménagement du Littoral, Alger, 2017.

<file:///C:/Users/m/Desktop/M%C3%A9moire/ing%20coliforme.pdf>

[27] Reggam A., Contribution à l'étude de la qualité microbiologique et physico-chimique des eaux d'Oued Seybouse, thèse doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2015.

[28] Maïga A., Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDM.SA dans la ville de Bamako : Évaluation saisonnière, thèse de doctorat, Université de Bamako, Mali, 2005.

<file:///C:/Users/m/Desktop/M%C3%A9moire/05P43%20doctorat%20analyse.pdf>

[29] Rouaiguia M., Cheriet M., Qualité microbiologique des eaux d'Oued Messida (Wilaya d'El-Tarf), mémoire de master, Université du 8 Mai 1945, Guelma, 2009.

<https://bucket.theses-algerie.com/files/repositories-dz/1988378758885481.pdf>

[30] Attab S., Amélioration de la qualité microbiologique des eaux épurées par boues activées de la station d'épuration Haoud Berkaoui par l'utilisation d'un filtre à sable local, mémoire de magister, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2011.

[31] Aouiffat S., Guerbass S, Étude microbiologique et physicochimique de l'eau dans la région de Laghouat, mémoire de master, Université Amar Telidji de Laghouat, 2019.

<https://dspace.lagh-univ.dz/server/api/core/bitstreams/b22a1a07-f063-4325-bce9-0949fd111257/content>

Chapitre IV

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Les résultats des analyses :

Le tableau suivant représente la variation des moyennes des paramètres de l'eau brute et l'eau traitée durant février jusqu'à avril et les normes d'eau potable.

Tableau IV.1 : La moyenne des résultats des paramètres de l'eau d'Ain zada avec les normes.

Type d'eau		Eau brute			Eau traitée			Les normes d'eau potable
Mois		Février	Mars	Avril	Février	Mars	Avril	
Paramètres	Unités							
T	°C	9,94	11,36	12,97	10,77	12,04	14,2	15
pH	-	7,81	7,86	7,87	7,68	7,74	7,67	≥ 6,5 et ≤ 9
Conductivité	μS/cm	1479.1	1324.1	1417.5	1221.78	1335.63	1423.08	2800
O ₂ dissout	mg/l	5.39	5.85	4.05	9.638	9.327	9.012	10
Couleur	mg/l pt	99.14	56.95	61.5	10.4	8.97	61.5	15
Turbidité	NTU	59.12	32.46	34.4	3.22	2.91	2.63	5
NH ₄	mg/l	5.54	0.45	0.28	0.03	0.01	0.01	0.5
NO ₂	mg/l	1.16	1.35	0.47	0	0	0.01	0.2
NO ₃	mg/l	4.31	8	6.73	4.228	11.12	9.62	50
Al	mg/l				0.06	0.07	0.08	0.2
Fer	mg/l	0.24	0.06	0.17	0.05	0.04	0.04	0.3
PO ₄	mg/l	0.427	0.36	0.34	0.092	0.017	0.049	5
SO ₄	mg/l	251.54	230.44	225.26	293.14	230.44	225.26	400
RS	mg/l	1033	906	839.75	1026.5	917.25	1000	1500
Na ⁺	mg/l	179.85	153.57	135.53	142.63	157.81	159.89	200
K ⁺	mg/l	10.2	8.37	11.12	6.23	8.17	9.51	12
TH	mg/l de CaCO3	43.5	43.7	45.55	32.88	43.92	47.04	500

Chapitre IV : Résultats et discussion

Ca	mg/l de CaCO ₃	95.8	99	98.2	99.8	101.63	94	200
Mg	mg/l de CaCO ₃	46.92	45.48	50.4	32.88	43.92	47.04	-
Mn	mg/l	0.26	0.28	0.33	0	0	0	50
MO	mg/l	11.8	8.05	9.8	2.98	3.24	4.04	5
Cl ⁻	mg/l	262.72	211.03	241.07	189.48	224.48	218.63	500
TAC	mg/l	162.59	142.75	161.5	126.09	132.5	144.5	-
DBO ₅	mgO ₂ /l	25	13	10	0	0	0	-
DCO	mgO ₂ /l	57.2	57.6	67.2	0	0	0	-
NTK	mg/l	2.03	1.4	0.91	0.84	0.4	0.21	-

L'évaluation physico-chimique (février-avril) confirme la haute efficacité du procédé de potabilisation. La clarification assure un abattement drastique de la turbidité, de la couleur et des matières organiques, tandis que l'élimination de la pollution ammoniacale valide le bon déroulement des processus d'oxydation. Malgré la forte minéralisation naturelle de l'eau brute, l'ensemble des paramètres de l'eau finale traitée est stabilisé sous les seuils réglementaires, attestant d'une conformité rigoureuse avec les normes de potabilité en vigueur.

IV.1.1. Les paramètres physico-chimiques :

IV.1.1.1. pH :

Les résultats de la mesure de pH des eaux brutes et traitées du niveau de station Ain-Zada

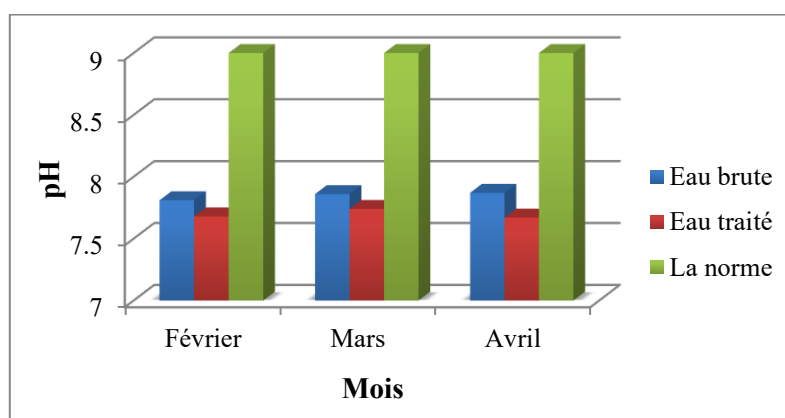


Figure IV.1 : Variation du pH

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats montrent que le pH de l'eau brute et de l'eau traitée varie très légèrement entre février et avril. Une faible augmentation est observée en mars, suivi d'une légère diminution en avril. Ces variations peuvent être liées à l'évolution de l'alcalinité (TAC), de la teneur en dioxyde de carbone dissous, de la température ainsi que l'utilisation de sulfate d'aluminium, qui peut entraîner une légère baisse du pH. Malgré ces fluctuations, toutes les valeurs restent dans les limites de la norme algérienne (6,5 à 9), ce qui indique que l'eau conserve un caractère légèrement basique et une bonne stabilité chimique.

IV.1.1.2. La conductivité :

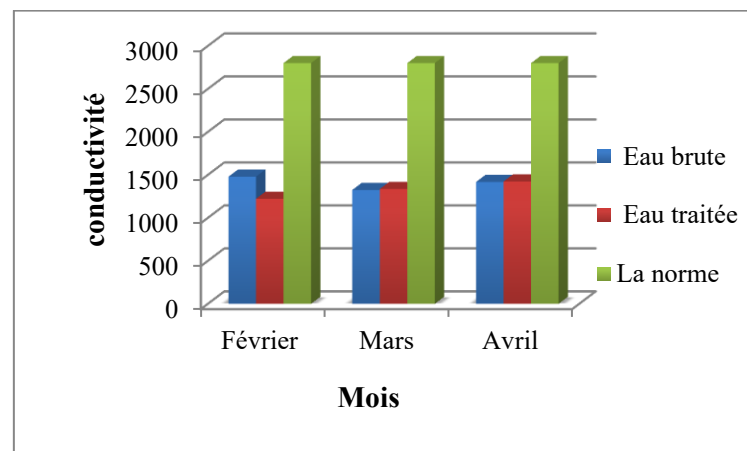


Figure IV.2 : Variation de la conductivité.

La figure IV.2 montre que la conductivité présente des variations modérées durant la période étudiée. La conductivité de l'eau brute varie entre environ 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tandis que celle de l'eau traitée passe d'environ 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Malgré cette légère augmentation, les valeurs restent largement inférieures à la norme fixée à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La baisse de conductivité en mars peut être liée à une dilution de l'eau due aux précipitations, ce qui réduit la concentration en sels dissous malgré l'effet potentiel de la température.

À l'inverse, la légère augmentation en avril peut être expliquée par une reprise de l'évaporation et une concentration des ions, renforçant ainsi la conductivité.

Toutefois, la conductivité de l'eau traitée reste stable et bien contrôlée par rapport à l'eau brute, ce qui témoigne de l'efficacité du traitement appliqué au niveau de la station

IV.1.1.3. Oxygène dissout :

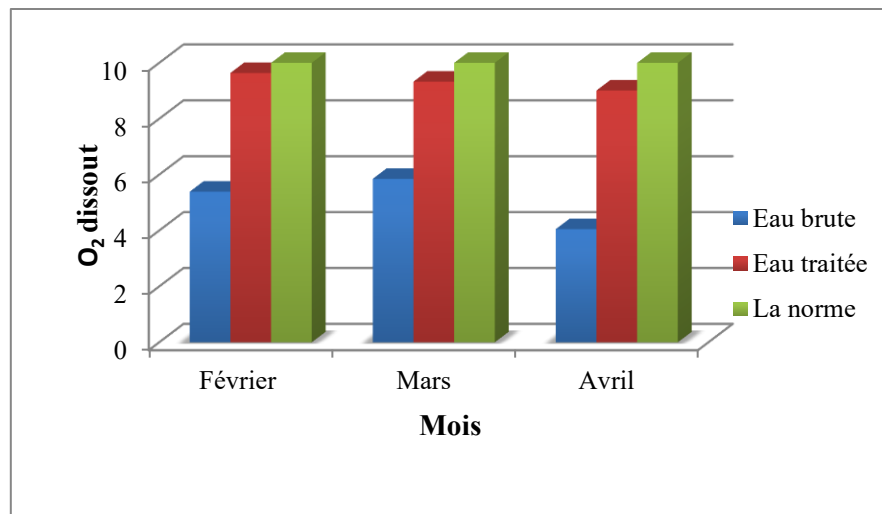


Figure IV.3 : Variation de l'oxygène dissout.

Pour l'eau brute, les valeurs enregistrées sont de **5.39 mg/L en février**, **5.85 mg/L en mars** et **4.05 mg/L en avril**. L'augmentation observée en mars peut être expliquée par les précipitations et le brassage de l'eau par le vent, favorisant la dissolution de l'oxygène dans l'eau. En revanche, la diminution importante en avril est probablement liée à l'élévation de la température, qui réduit la solubilité de l'oxygène, ainsi qu'à l'augmentation de l'activité biologique et de la dégradation de la matière organique consommant l'oxygène dissous.

Concernant l'eau traitée, les valeurs restent élevées et relativement stables : **9.638 mg/L en février**, **9.327 mg/L en mars** et **9.012 mg/L en avril**. Cette forte teneur en oxygène dissous indique une bonne oxygénation de l'eau après traitement, favorisée par les étapes d'aération, de décantation et de filtration. La légère diminution observée d'un mois à l'autre peut être attribuée à l'augmentation progressive de la température.

IV.1.1.4. La turbidité :

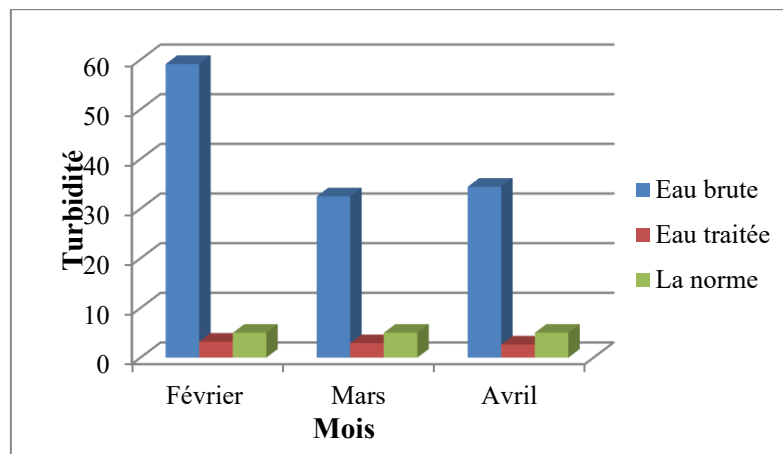


Figure IV.4 : Variation de la turbidité.

Les résultats de la turbidité montrent une variation saisonnière influencée par les conditions climatiques, le vent et le niveau de la prise d'eau. La forte turbidité enregistrée en février (59.12 NTU) s'explique par la prise d'eau à la cote 837 m, plus riche en matières en suspension, ainsi que par le brassage des eaux dû au vent et aux précipitations. En mars et avril, le déplacement de la prise d'eau à la cote 845 m, suite au remplissage du barrage, a permis une diminution de la turbidité de l'eau brute.

Après traitement, les valeurs deviennent faibles et stables (3.22 à 2.63 NTU), ce qui confirme l'efficacité des procédés de coagulation–floculation, décantation et filtration dans l'élimination des particules en suspension et l'amélioration de la qualité physique de l'eau potable.

IV.1.1.5. L'ammonium NH_4 :

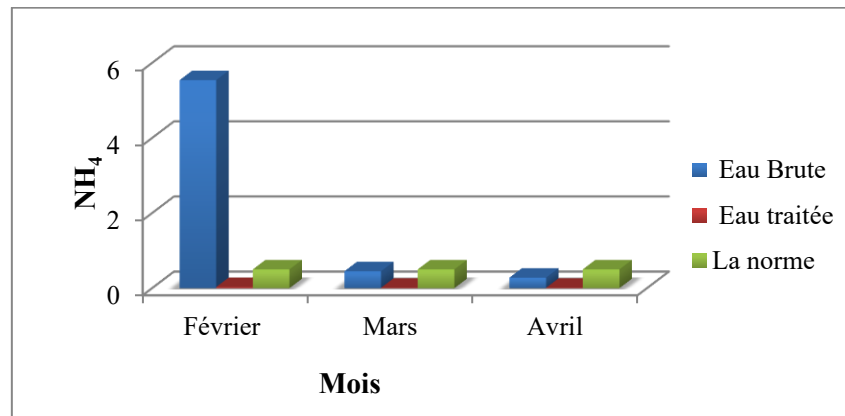


Figure IV.5 : Variation de l'ammonium.

Les concentrations en ammonium mesurées dans l'eau du barrage de Barrage d'Aïn Zada montrent une variation importante dans l'eau brute, passant de **5.54 mg/L en février** à **0.45 mg/L en mars**, puis **0.28 mg/L en avril**.

Cette diminution progressive traduit une amélioration de la qualité de l'eau au cours du temps. La valeur élevée observée en février peut être liée à la dégradation de la matière organique et aux apports externes (ruissellement, eaux de surface chargées en azote ammoniacal). En revanche, la baisse en mars et avril peut s'expliquer par plusieurs processus naturels, notamment la **nitrification**, où l'ammonium est oxydé en nitrites puis en nitrates en présence d'oxygène dissous. Elle peut également être favorisée par la dilution due aux apports hydriques et par l'activité biologique dans le milieu aquatique.

Concernant l'eau traitée, les concentrations en ammonium sont très faibles et stables (**0.03 mg/L à 0.01 mg/L**), ce qui indique une **élimination quasi totale** de ce composé lors du traitement.

IV.1.1.6. Nitrites (NO_2^-)

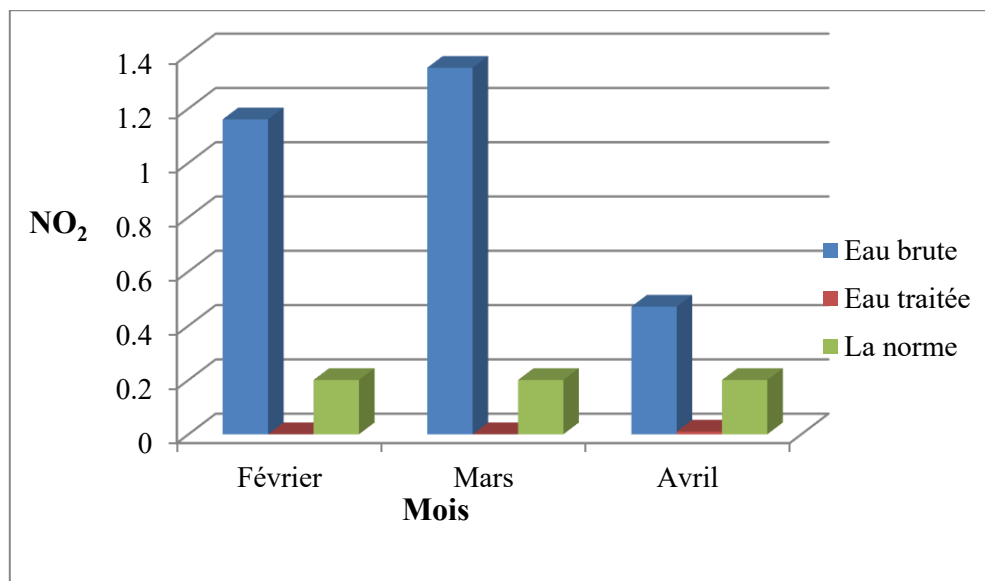


Figure IV.6 : Variation des nitrites.

La figure montre que la concentration en nitrites présente des variations au cours de la période étudiée. Dans l'eau brute, les teneurs passent de 1,16 mg/L en février à 1,35 mg/L en mars, puis diminuent à 0,47 mg/L en avril.

Cette augmentation observée en mars peut être liée à la dégradation de la matière organique et à l'activité bactérienne dans le milieu aquatique, favorisant la formation des nitrites. En revanche, la baisse enregistrée en avril peut s'expliquer par l'oxydation progressive des nitrites en nitrates sous l'effet du processus de nitrification. Elle peut également être favorisée par la dilution due aux apports hydriques et par l'amélioration des conditions physicochimiques de l'eau.

Concernant l'eau traitée, les concentrations en nitrites sont très faibles et stables (0 mg/L en février et mars, puis 0,01 mg/L en avril), ce qui indique une élimination presque totale de ce composé lors du traitement. Les valeurs obtenues restent largement inférieures à la norme de potabilité fixée à 0,2 mg/L, confirmant ainsi l'efficacité du traitement et la bonne qualité de l'eau distribuée.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1.1.7. Nitrate :

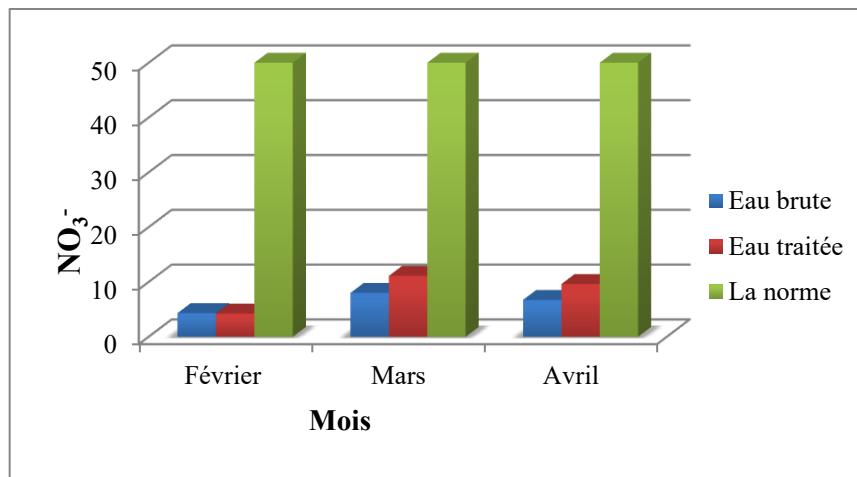


Figure IV.7 : Variation de nitrates.

Les concentrations en nitrates mesurées dans l'eau du Barrage d'Ain Zada montrent des variations entre les différents mois d'étude. Dans l'eau brute, les valeurs enregistrées sont de **4.31 mg/L en février**, **8 mg/L en mars** et **6.73 mg/L en avril**.

L'augmentation observée en mars peut être expliquée par :

- L'intensification du processus de nitrification dans le milieu aquatique. En présence d'oxygène dissous, les bactéries nitrifiantes transforment l'ammonium puis les nitrites en nitrates, entraînant ainsi une augmentation de la concentration en NO_3^- .

- Les apports de ruissellement et les matières organiques azotées.

La légère diminution enregistrée en avril peut être liée :

- à une dilution des nitrates dans le barrage,
- à l'absorption des nitrates par les algues et microorganismes aquatiques,
- Ou à une stabilisation du cycle de l'azote après la réduction importante de l'ammonium et des nitrites.

Concernant l'eau traitée, les nitrates restent présents avec des valeurs relativement élevées. Cela s'explique par le fait que les nitrates sont des composés très solubles et stables, difficilement éliminés par les procédés classiques de traitement (coagulation, décantation et filtration). De plus, l'oxydation de l'ammonium et des nitrites pendant le traitement peut contribuer à leur augmentation.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Globalement, les résultats montrent que les nitrates proviennent principalement des transformations biologiques du cycle de l'azote et qu'ils persistent après traitement en raison de leur stabilité chimique dans l'eau.

IV.1.1.8. TAC :

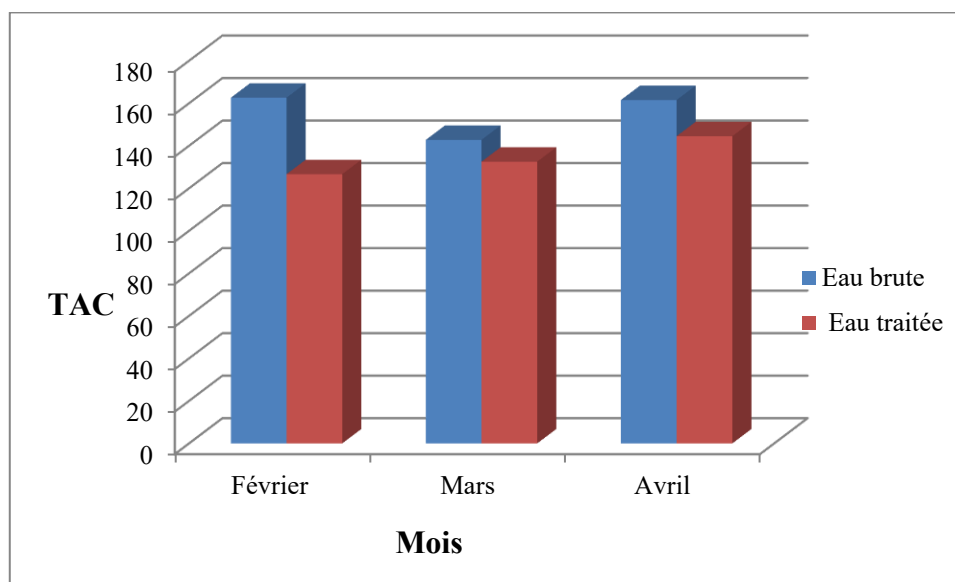


Figure IV.8 : Variation de titre alcalimétrique.

Les valeurs du TAC de l'eau brute montrent des variations modérées durant la période étudiée. En février, le TAC atteint **162,59 mg/L CaCO₃**, puis diminue à **142,75 mg/L CaCO₃** en mars. Cette baisse peut être liée à une dilution des bicarbonates par les précipitations ou à une modification de l'alimentation du barrage. En avril, le TAC augmente de nouveau pour atteindre **161,50 mg/L CaCO₃**, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation de la minéralisation de l'eau due au lessivage des sols et à l'apport de sels carbonatés. Ces résultats indiquent que l'eau brute possède une alcalinité relativement stable avec de faibles fluctuations saisonnières.

Pour l'eau traitée, le TAC est de **126,09 mg/L CaCO₃** en février, puis augmente légèrement à **132,50 mg/L CaCO₃** en mars et atteint **144,50 mg/L CaCO₃** en avril. Cette augmentation progressive peut être liée aux procédés de traitement appliqués à la station, notamment l'ajout de réactifs correcteurs du pH ou de l'alcalinité afin d'assurer la stabilité chimique de l'eau distribuée. Malgré cette hausse, les valeurs de l'eau traitée restent inférieures à celles de l'eau brute, ce qui traduit une légère réduction de l'alcalinité au cours du traitement tout en maintenant une eau conforme et stable pour la consommation.

IV.1.1.8. Matière organique (MO) :

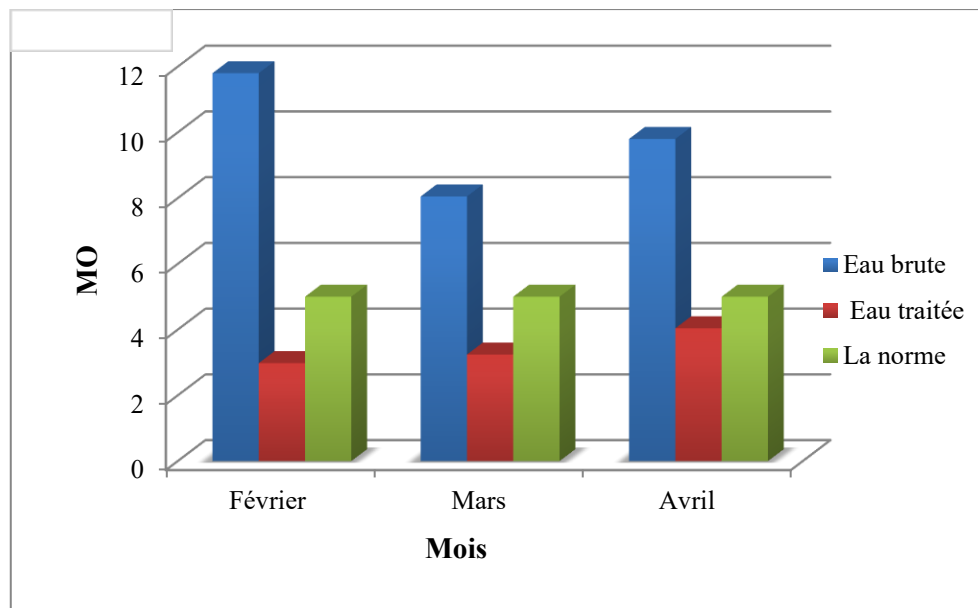


Figure IV.9: Variation de la matière organique.

La figure IV.9 montre que la teneur en matière organique de l'eau brute fluctue durant la période d'étude. Elle atteint **11,8 mg/L** en février, puis diminue à **8,05 mg/L** en mars, avant de remonter à **9,8 mg/L** en avril.

La diminution observée en mars peut être attribuée à la décomposition naturelle de la matière organique par les micro-organismes présents dans le milieu aquatique ainsi qu'à une baisse des apports extérieurs. En revanche, l'augmentation enregistrée en avril pourrait être due au ruissellement des eaux pluviales entraînant des substances organiques vers le barrage.

Pour l'eau traitée, les concentrations sont de **2,98 mg/L** en février, **3,24 mg/L** en mars et **4,04 mg/L** en avril. Ces valeurs restent inférieures à celles mesurées dans l'eau brute, ce qui traduit l'efficacité du traitement dans la réduction de la charge organique. La légère hausse observée au mois d'avril peut être liée à l'augmentation de la teneur en matière organique dans l'eau brute.

Globalement, les résultats mettent en évidence une diminution importante de la matière organique après traitement, ce qui témoigne de la performance des procédés de potabilisation appliqués à la station.

IV.1.2. Les paramètres bactériologiques

Tableau IV.2 : Les résultats des paramètres bactériologiques

Chapitre IV : Résultats et discussion

Type d'eau		Eau brute			Eau traitée			Les normes d'eau potable
Mois		Février	Mars	Avril	Février	Mars	Avril	
Paramètres	Unités							
C.T	UFC/ml	276,5	267,5	131,5	0	0	0	0
E.Coli	UFC/ml	15,5	0	26	0	0	0	0
Setrpto	UFC/ml	276,5	131,5	29	0	0	0	0
Germes à 22°C	UFC/ml	850	400	100	20	0	0	100
Germes à 37°C	UFC/ml	250	450	100	13	0,75	0	20
Spores	UFC/ml	135	125	200	0	0	0	0

Le procédé de traitement applique une barrière hautement efficace, éliminant la quasi-totalité de la charge bactérienne initiale et ramenant les germes pathogènes (C.T, E.coli, Streptocoques, Spores) à zéro. Bien qu'une infime présence résiduelle de germes communs soit notée en février et mars, les valeurs chutent rapidement pour atteindre une pureté totale en avril. Au final, l'eau traitée affiche une excellente qualité microbiologique et s'avère parfaitement conforme aux normes réglementaires d'eau potable.

IV.1.2.1. Coliformes totaux :

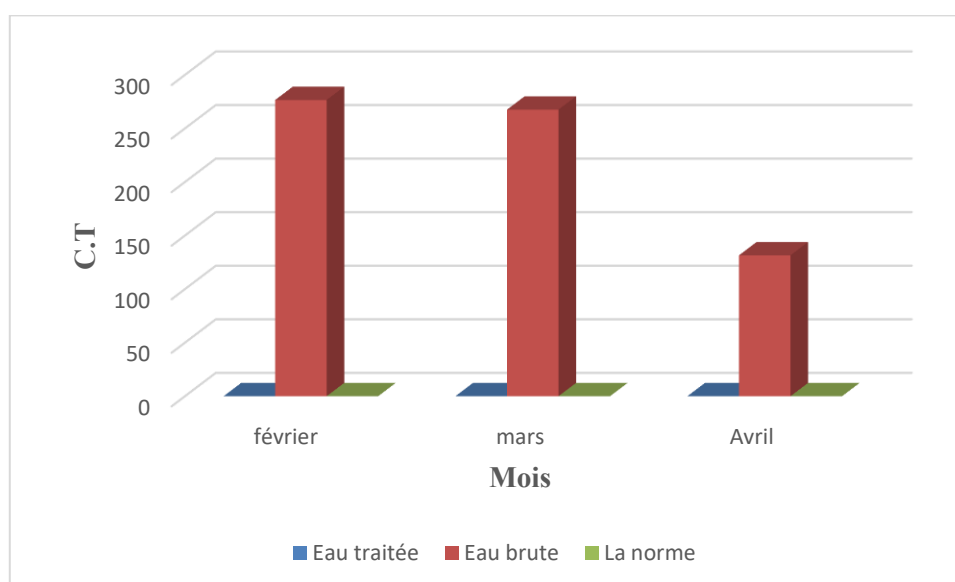


Figure IV.10 : Variation des coliformes totaux.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats des coliformes totaux dans l'eau brute montrent des valeurs élevées et relativement stables en février et mars avec **276,5** UFC/100 ml, puis une diminution en avril avec **131,5** UFC/100 ml.

Cette évolution met en évidence une contamination microbiologique importante de l'eau brute, indiquant une dégradation de sa qualité sanitaire. La présence de ces bactéries traduit généralement une influence des apports externes au niveau du bassin versant et des conditions environnementales du milieu aquatique.

L'absence de variation entre février et mars suggère une stabilité des sources de contamination durant cette période. En revanche, la baisse observée en avril peut être attribuée à une amélioration relative de la qualité de l'eau, probablement liée à une diminution des apports polluants et à l'effet d'autoépuration naturelle du milieu.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que l'eau brute présente une charge bactérienne non négligeable, ce qui nécessite un traitement approprié avant sa distribution afin de garantir la conformité aux normes microbiologiques et la protection de la santé publique.

IV.1.2.2. Coliformes fécaux (E.coli) :

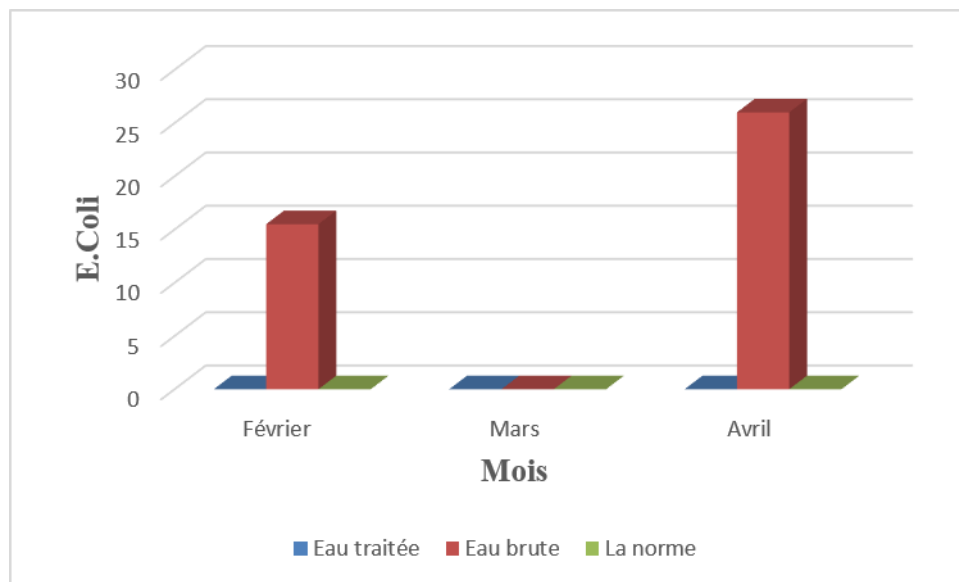


Figure IV.11 : Variation des coliformes fécaux.

Les résultats des coliformes fécaux dans l'eau brute indiquent des valeurs variables au cours de la période étudiée, avec 15,5 UFC/100 ml en février, 0 UFC/100 ml en mars et 26 UFC/100 ml en avril.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Ces variations traduisent une contamination fécale ponctuelle et non constante de l'eau brute, ce qui reflète l'influence de sources extérieures variables sur la qualité microbiologique de la ressource. La présence de coliformes fécaux en février et surtout en avril montre des épisodes de pollution d'origine fécale, tandis que leur absence en mars peut être liée à une amélioration temporaire des conditions du milieu ou à une diminution des apports contaminés.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence une instabilité de la qualité microbiologique de l'eau brute vis-à-vis de la contamination fécale, ce qui confirme la nécessité d'un contrôle régulier et d'un traitement efficace afin de limiter les risques sanitaires.

IV.1.2.2.3. Streptocoques

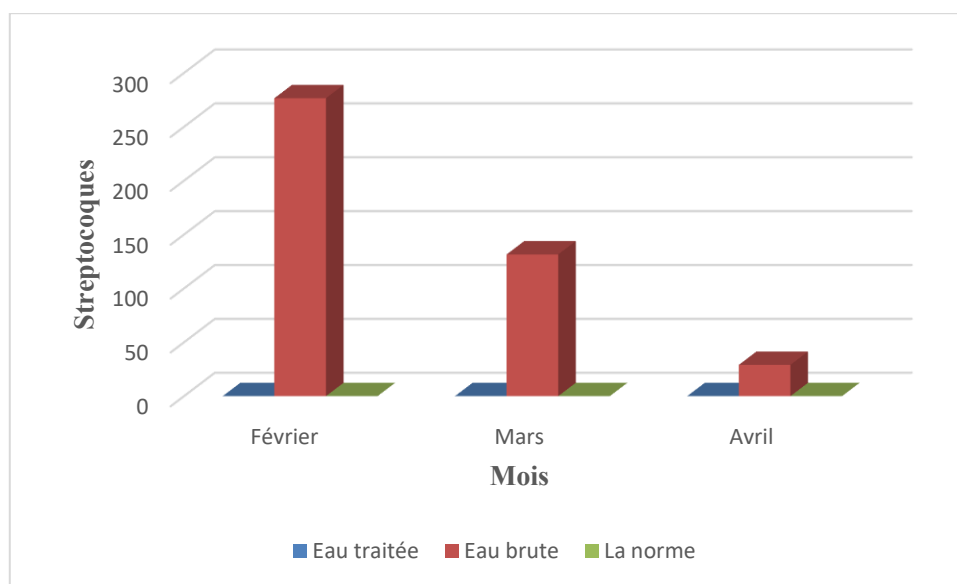


Figure IV.12 : Variation des streptocoques.

Les résultats des streptocoques dans l'eau brute montrent une diminution progressive au cours de la période étudiée, passant de 276,5 UFC/100 ml en février à 131,5 UFC/100 ml en mars, puis à 29 UFC/100 ml en avril.

Cette évolution met en évidence une amélioration progressive de la qualité microbiologique de l'eau brute vis-à-vis de la contamination d'origine fécale, les streptocoques étant des indicateurs de pollution principalement liée aux rejets d'origine animale et humaine. Les valeurs élevées observées en février et mars traduisent une charge bactérienne importante, probablement influencée par les apports extérieurs et les conditions environnementales favorables à la survie de ces microorganismes. La baisse enregistrée en avril peut être expliquée par la diminution des sources de contamination, associée aux phénomènes naturels d'autoépuration et de dilution du milieu aquatique.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Malgré cette tendance à la baisse, la présence des streptocoques indique que l'eau brute reste sous influence d'une contamination fécale, ce qui nécessite un suivi microbiologique continu et un traitement approprié avant utilisation.

IV.1.2.4. Spores :

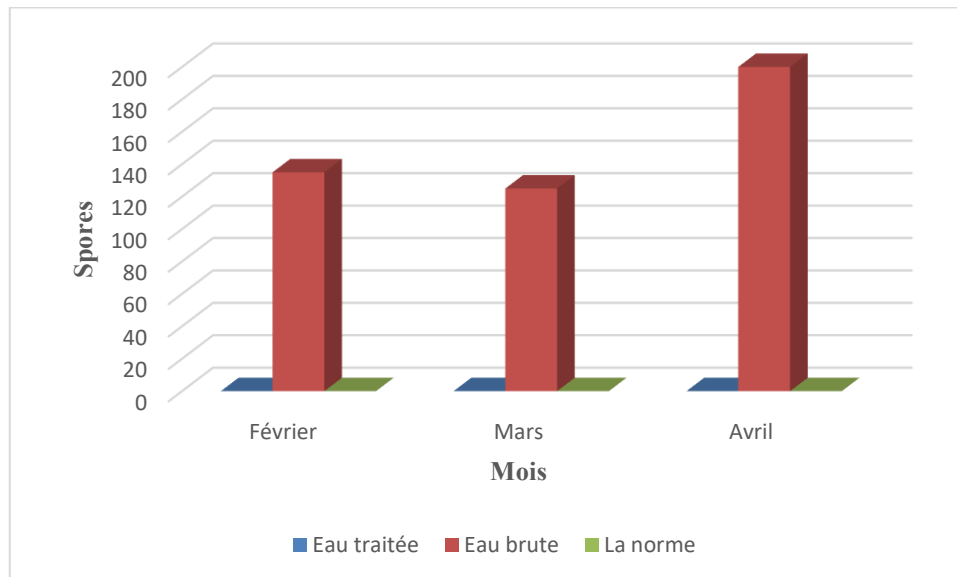


Figure IV.13: Variation des spores.

Les résultats des spores dans l'eau brute montrent une légère diminution entre février et mars, passant de 135 UFC/100 ml à 125 UFC/100 ml, suivie d'une augmentation marquée en avril atteignant 200 UFC/100 ml.

Cette évolution traduit une variation de la contamination d'origine persistante dans le milieu aquatique, les spores étant des formes résistantes de microorganismes pouvant survivre longtemps dans l'environnement. La baisse observée en mars peut être liée à des phénomènes de dilution ou à des conditions environnementales moins favorables à leur dispersion. En revanche, l'augmentation enregistrée en avril indique une reprise ou un apport important de matières contaminantes, probablement favorisé par le ruissellement ou le lessivage des sols vers le bassin versant.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la charge en spores reste relativement élevée et instable, ce qui reflète une contamination environnementale persistante de l'eau brute et nécessite un contrôle régulier ainsi qu'un traitement adapté avant utilisation.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.2. Application du plan d'expérience

IV.2.1. Choix des facteurs d'étude

Afin d'optimiser le processus de coagulation-floculation et de comprendre les interactions entre les différents paramètres opératoires, un plan d'expériences de Box-Behnken à trois facteurs (Ccoag, Cfloc et pH) a été appliqué. La turbidité résiduelle (Turb) a été choisie comme variable de réponse à minimiser.

Les domaines de variation ainsi que les niveaux codés (-1, 0, +1) choisis pour les trois variables indépendantes (Ccoag, Cfloc et pH) sont regroupés dans le Tableau suivant :

Tableau IV. 3 : Facteurs et leurs niveaux correspondants

Facteur	Symbole	Unité	Niveau bas -1	Niveau central 0	Niveau haut +1
Concentration du coagulant	Ccoag	mg/l	25	30	35
Concentration du floculant	Cfloc	mg/l	0,06	0,08	0,1
pH	Ph	-	6	7	8

L'analyse a été réalisée pour estimer la fonction de réponse, donc le rendement d'extraction peut être prévu par le modèle quadratique comme le montre l'équation

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i + \sum_{i < j}^n \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i^2 + \dots e \quad (4)$$

IV.2.2. Matrice du plan

Afin d'étudier l'effet des interactions entre les différentes variables opératoires, un plan d'expériences de type Box-Behnken à 3 facteurs a été adopté. La matrice des essais correspondante est présentée dans le Tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Plan de Box-Behnken avec les réponses expérimentales

Ordre des essais	Ccoag	Cfloc	pH	Turbidité	Turbajustée
1	1	-1	0	20,3	21,1875

Chapitre IV : Résultats et discussion

2	1	0	1	23,4	22,8000
3	0	1	-1	14	14,2875
4	-1	0	1	24,1	25,3750
5	0	0	0	20,1	21,6333
6	-1	-1	0	25,5	24,5125
7	0	0	0	22,3	21,6333
8	0	0	0	22,5	21,6333
9	-1	0	-1	19,6	20,2000
10	0	-1	-1	13,4	13,7875
11	-1	1	0	27,5	26,6125
12	0	1	1	22,2	21,8125
13	1	0	-1	11,9	10,6250
14	0	-1	1	23,9	23,6125
15	1	1	0	16,8	17,7875

IV.2.3. Analyse statistique :

IV.2.3.1. Equation de régression en unités non codées

Les variables opératoires du procédé de coagulation-floculation ont été étudiées par la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) selon un plan de Box-Behnken. Après analyse statistique des résultats, un modèle quadratique a été proposé pour prédire le rendement d'élimination de la turbidité, exprimé par l'équation suivante :

$$Turb = 21,633 - 3,038 C_{coag} - 0,325 C_{floc} + 4,338 pH + 1,133 C_{coag}^2 - 0,242 C_{floc}^2 - 3,017 pH^2 - 1,375 C_{coag} * C_{floc} + 1,750 C_{coag} * pH - 0,575 C_{floc} * pH$$

(5)

IV.2.4. Analyse des effets des facteurs (Diagramme de Pareto)

Pour identifier hiérarchiquement les facteurs ayant un impact significatif sur l'élimination de la turbidité, le diagramme de Pareto des effets normalisés a été tracé (Figure [IV.14]).

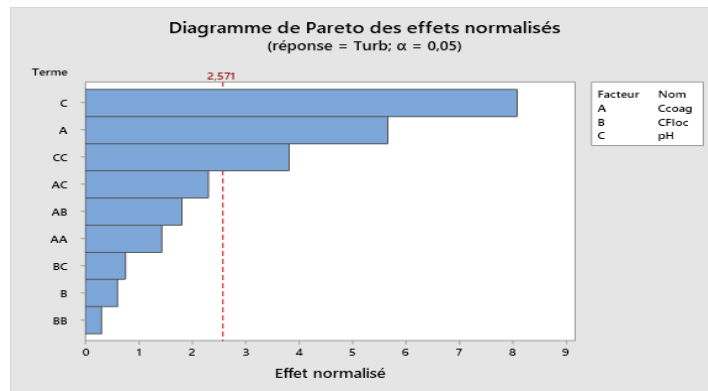


Figure IV.14 : Diagramme de Pareto des effets normalisés de turbidité.

D'après la Figure IV.14 (diagramme de Pareto), le pH reste le paramètre le plus influent sur le rendement de la coagulation-floculation. La dose de coagulant (Ccoag) influe également d'une manière très importante, tandis que la dose de floculant (CFloc) présente un impact négligeable sur le procédé dans le domaine d'étude choisi.

IV.2.5. Validation du modèle

Pour évaluer la qualité d'ajustement du modèle mathématique développé, le graphique de comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le modèle a été tracé (Figure IV.15)

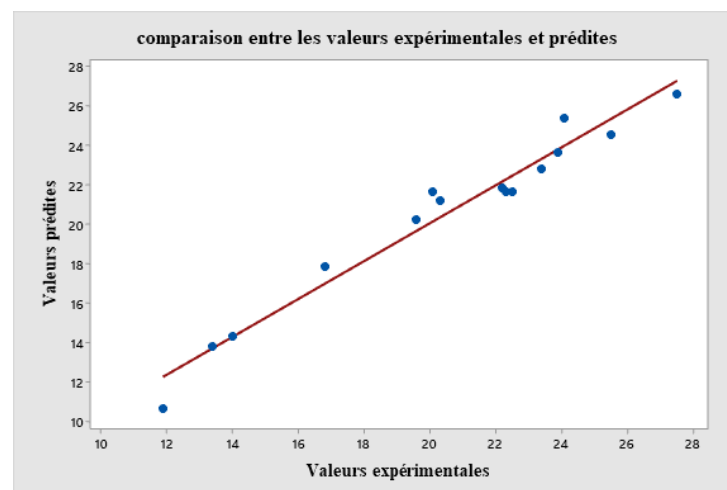


Figure IV.15 : Droite de Henry.

IV.2.6. Le coefficient de détermination R^2 :

Tableau IV.5 : Récapitulatif de modèle.

S	R^2	R^2 ajust	R^2 prévu
---	-------	-------------	-------------

Chapitre IV : Résultats et discussion

1,51718	96,14%	89,2%	54,63%
---------	--------	-------	--------

Cette corrélation linéaire positive entre les valeurs expérimentales et prédites est cohérente avec les valeurs élevées de R^2 et R^2 ajusté obtenues précédemment, ce qui valide la fiabilité statistique du modèle pour l'optimisation du procédé étudié.

Coefficients codés

Terme	Coeff	CoefErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	21,633	0,876	24,70	0,000	
Ccoag	-3,038	0,536	-5,66	0,002	1,00
CFloc	-0,325	0,536	-0,61	0,571	1,00
Ph	4,338	0,536	8,09	0,000	1,00
Ccoag*Ccoag	1,133	0,790	1,44	0,211	1,01
CFloc*CFloc	-0,242	0,790	-0,31	0,772	1,01
pH*Ph	-3,017	0,790	-3,82	0,012	1,01
Ccoag*CFloc	-1,375	0,759	-1,81	0,130	1,00
Ccoag*Ph	1,750	0,759	2,31	0,069	1,00
CFloc*Ph	-0,575	0,759	-0,76	0,483	1,00

IV.2.7. Analyse de la variance pour la justification du modèle

Tableau IV.6 : Analyse de variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	9	286,871	31,875	13,85	0,005
Erreur	5	11,509	2,302		
Total	14	298,380			

D'après la valeur de $P = 0,005$ elle est inférieure à la valeur 5% prise comme risque dans le modèle, on a par la suite justifié la validité de ce modèle.

IV.2.7. Analyses des graphiques :

1. Diagramme des effets principaux

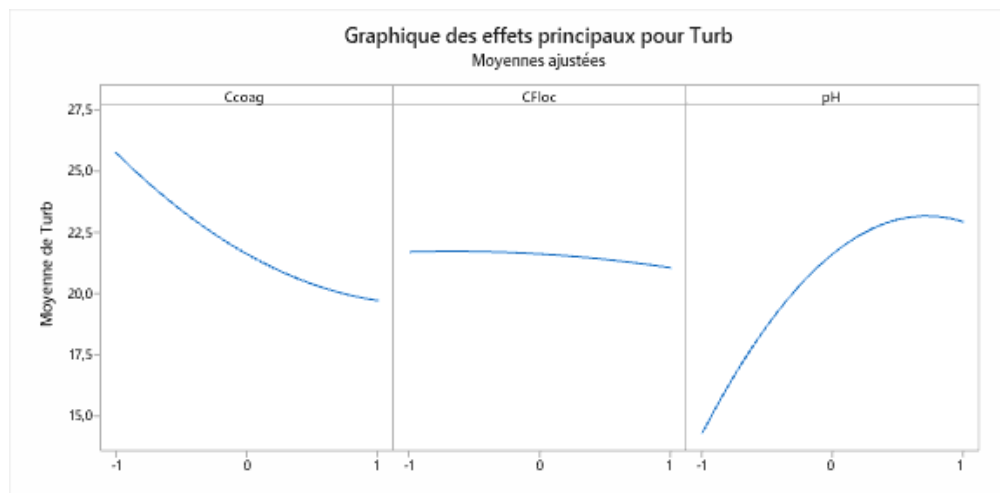


Figure IV.16 : Diagramme des effets principaux pour la turbidité.

Ce diagramme permet d'évaluer individuellement l'effet de chaque facteur sur la turbidité

Pour le coagulant (Ccoag) : L'augmentation de la dose du coagulant de -1 (25 mg/l) à +1 (35 mg/l) entraîne une diminution progressive de la turbidité résiduelle. Le point optimal se situe donc dans l'intervalle $[0, 1]$, correspondant à $80 \text{ ml} \leq \text{coagulant} \leq 100 \text{ ml}$.

Pour le floculant (CFloc) : L'effet de ce facteur reste relativement faible sur la réponse, avec une légère amélioration (diminution de la turbidité) vers les valeurs positives $[0, 1]$.

Pour le pH : Contrairement aux autres facteurs, la turbidité résiduelle minimale (meilleure clarification) est obtenue aux valeurs faibles du pH (proches de -1). L'augmentation du pH vers l'intervalle $[0, 1]$ provoque une augmentation indésirable de la turbidité moyenne.

2. Le Diagramme des effets d'interaction

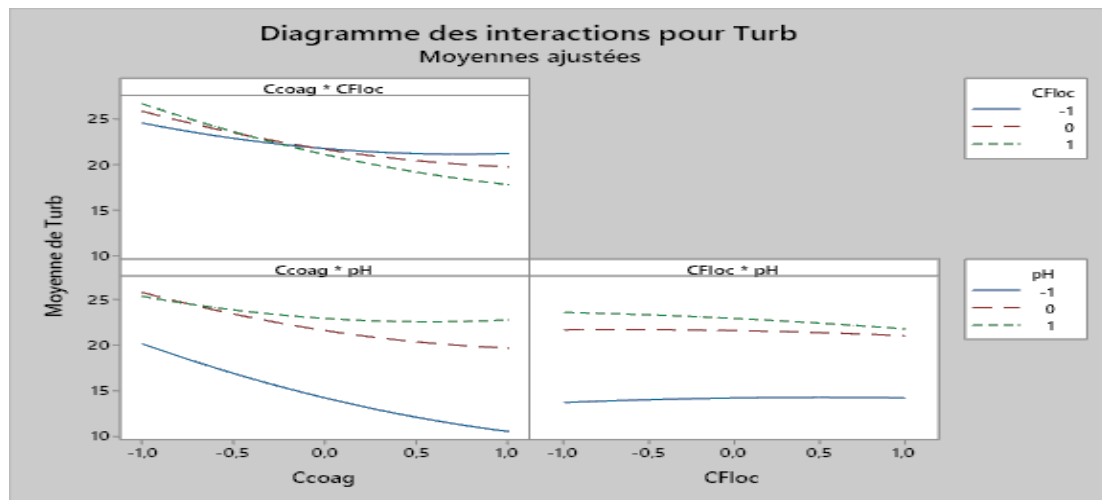


Figure IV.17: Diagramme des interactions pour la turbidité moyenne résiduelle (Turb).

L'analyse du diagramme des interactions permet d'évaluer de manière croisée l'interdépendance des trois facteurs étudiés (C_{coag}, C_{floc} et pH) sur la turbidité résiduelle moyenne :

Interaction C_{coag}*C_{floc} : Les courbes montrent que l'augmentation de la dose de coagulant de -1,0 à 1,0 entraîne une diminution systématique de la turbidité. Cette baisse est plus prononcée lorsque le floculant est à sa valeur maximale (C_{floc} = 1, courbe verte en pointillés), où la turbidité chute d'environ 26 NTU à près de 16 NTU. À l'inverse, à la valeur minimale du floculant

(C_{floc} = -1, courbe bleue continue), la pente est moins inclinée, stabilisant la turbidité autour de 19 NTU à forte dose de coagulant. Cela confirme une interaction positive entre les deux réactifs pour optimiser la décantation.

Interaction C_{coag}*pH : Cette interaction s'avère être la plus significative. On observe une divergence nette des profils selon le niveau de pH. L'effet de clarification du coagulant est maximal à un pH acide (pH = -1, courbe bleue continue), où la turbidité résiduelle atteint sa valeur la plus basse du diagramme, soit environ 10 NTU pour une dose C_{coag} = 1,0.

En revanche, en milieu basique (pH = 1, courbe verte), la capacité du coagulant à réduire la turbidité est fortement inhibée, maintenant des valeurs de turbidité élevées oscillant entre 26 et 22 NTU.

Interaction C_{floc}*pH : Les lignes de réponse pour cette interaction sont presque parallèles et horizontales, ce qui indique graphiquement une absence ou une très faible interaction directe entre

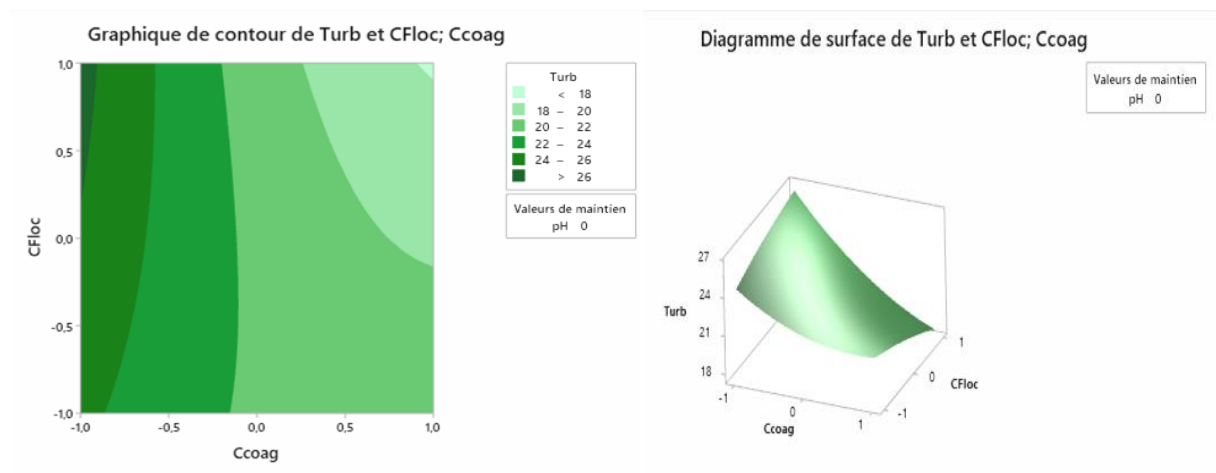
Chapitre IV : Résultats et discussion

le flocculant et le pH dans le domaine étudié. Quel que soit le niveau de C_{Floc} (de -1,0 à 1,0), la turbidité reste dictée par le pH : elle se stabilise à un niveau optimal bas d'environ 13 NTU à $pH = -1$, alors qu'elle stagne à des valeurs critiques élevées autour de 21 à 23 NTU pour des valeurs de pH moyennes (0) et basiques (1).

En somme, ce diagramme valide que le procédé de traitement est gouverné par l'effet synergique entre une dose élevée de coagulant ($C_{coag} = 1,0$) et un milieu acide ($pH = -1$), le flocculant jouant un rôle d'appoint pour affiner la taille des flocs.

IV.3. Les graphiques de contour et des surfaces de réponse :

IV.3.1. Pour le $pH=0$

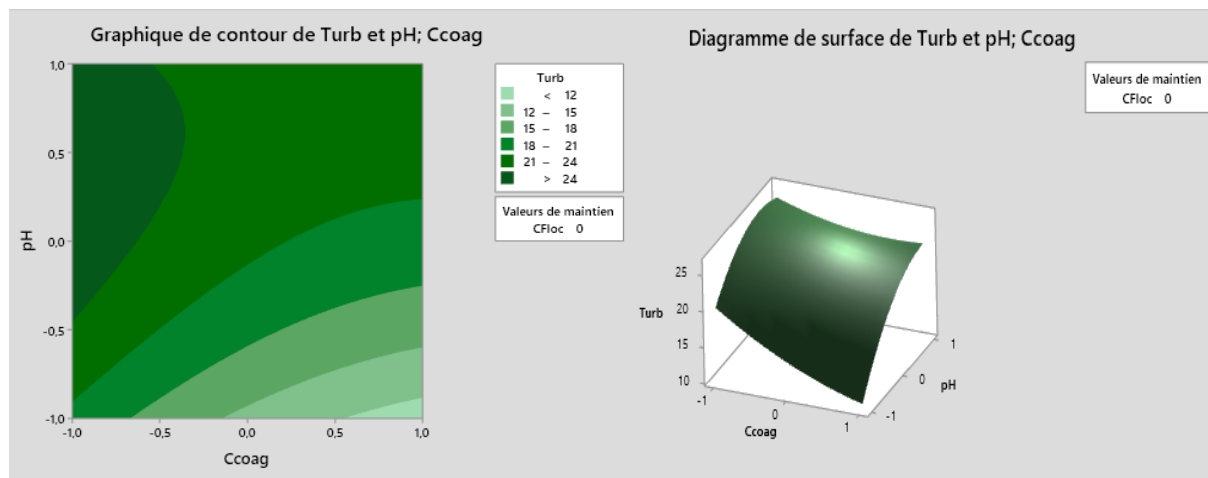


Les figures IV.18 : graphique de contour et le diagramme de surface mettent en évidence l'effet à $pH=0$

Les figures représentant le graphique de contour et le diagramme de surface mettent en évidence l'effet combiné du flocculant (C_{Floc}) et du coagulant (C_{coag}) sur la turbidité résiduelle (Turb), à $pH = 0$. L'allure presque verticale des lignes de contour démontre que la variation de la turbidité est dictée de manière prépondérante par la concentration du coagulant.

La zone d'efficacité maximale, caractérisée par la turbidité la plus basse, ($Turb < 18$ NTU), nuance vert clair), s'étend largement sur tout l'axe du flocculant (de -1,0 à 1,0) à condition de maintenir des concentrations élevées de coagulant (C_{coag} supérieur à 0,0 et allant jusqu'à 1,0). À l'inverse, les faibles doses de coagulant (C_{coag} de -1,0 à -0,6) conduisent systématiquement à des valeurs de turbidité maximales ($Turb > 26$ NTU, nuance vert foncé). Ces résultats confirment le rôle primordial du coagulant dans la déstabilisation colloïdale, tandis que le flocculant n'exerce qu'une influence secondaire dans ces conditions.

IV.3.2. Pour $C_{floc}=0$

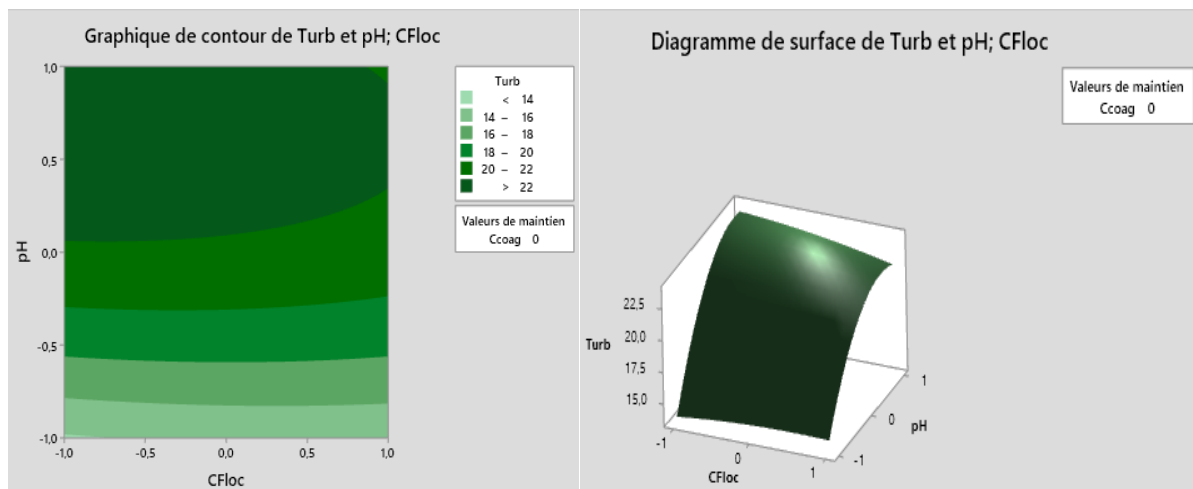


Les figures IV.19 : le graphique de contour et le diagramme de surface mettent en évidence l'effet à $C_{floc}=0$

L'analyse conjointe du diagramme de surface 3D et du graphique de contour montre une interaction significative entre le pH et la dose de coagulant (C_{coag}) sur la turbidité résiduelle, avec un gradient coloré s'étendant de valeurs inférieures à 12 NTU jusqu'à des teneurs supérieures à 24 NTU.

La zone de clarification optimale, caractérisée par la turbidité la plus faible ($Turb < 12$ NTU, représentée par la nuance vert clair), est localisée de manière ciblée dans la partie inférieure droite du graphique, correspondant à des valeurs de pH hautement acides (allant de -0.5 à -1.0) combinées à des concentrations de coagulant élevées (comprises entre 0.5 et 1.0). À l'inverse, une dégradation nette de l'efficacité du traitement est observée à mesure que la couleur verte s'assombrit, menant à une turbidité maximale ($Turb > 24$ NTU) dans la zone supérieure gauche, définie par un pH basique (de 0.5 à 1.0) et une faible dose de coagulant (de -1.0 à -0.5). Entre ces deux extrêmes, les plages intermédiaires ($12 < Turb < 24$ NTU) indiquent qu'une augmentation du pH vers des conditions basiques nécessite impérativement une augmentation proportionnelle de la dose C_{coag} pour maintenir un taux d'abattement de la turbidité acceptable, ce qui met en évidence l'effet antagoniste du pH par rapport au processus de déstabilisation colloïdale.

IV.3.3. Pour $C_{coag}=0$



Les figures IV.20 : Le graphique de contour et le diagramme de surface mettent en évidence l'effet à $C_{coag}=0$

L'allure presque horizontale des lignes de contour montre clairement que la variation de la turbidité dépend de manière prépondérante du pH, tandis que l'influence de C_{Floc} reste marginale. La zone d'efficacité maximale ($Turb < 14$ NTU, nuance vert clair) est localisée de façon homogène dans la partie inférieure, pour des valeurs de pH fortement acides (allant de -0,6 à -1,0) et ce, sur tout l'axe du floculant (de -1,0 à 1,0). À l'inverse, l'augmentation du pH vers des milieux basiques (0,4 à 1,0) conduit à une dégradation nette du traitement avec une turbidité maximale ($Turb > 22$ NTU, nuance vert foncé). Ces résultats confirment que le pH est le facteur clé dictant la déstabilisation colloïdale dans ces conditions

IV.4 Optimisation des réponses (Turbidité)

Tableau IV.7 : Les conditions optimales.

Paramètres	Valeur optimale
Concentration du coagulant	(+1) : 35 mg/l
Concentration du floculant	(+1) : 0,1 mg/l
pH	(-1) : 6
Turbidité théorique	9,26 NTU
Turbidité expérimentale	10,04 NTU

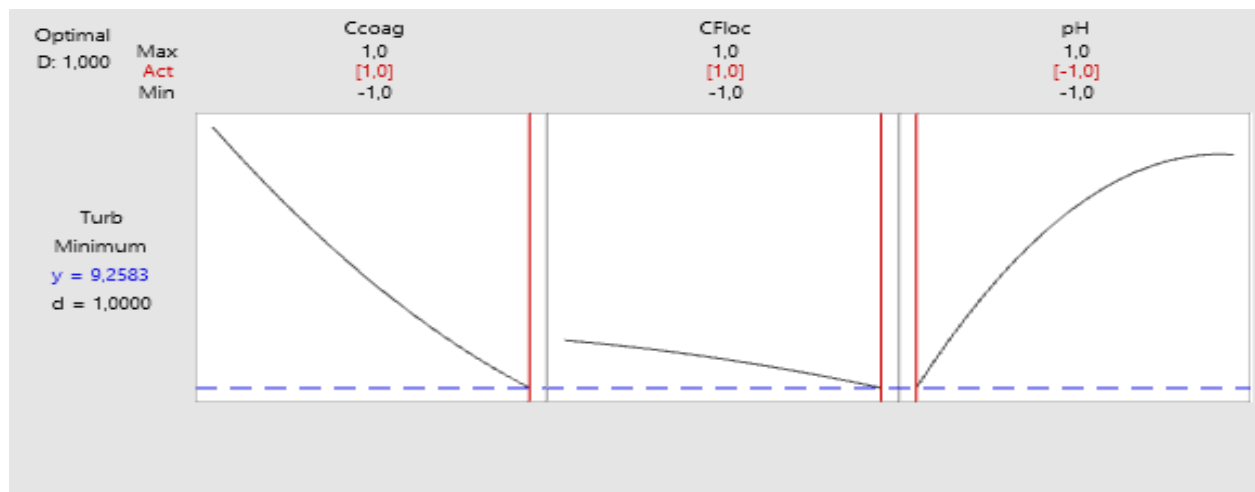


Figure IV.21 : Graphique d'optimisation des réponses.

Analyse des Effets des Facteurs sur la Turbidité

Les courbes bleues montrent l'impact de la variation de chaque facteur sur la turbidité lorsque les deux autres facteurs restent fixes.

Effet de la concentration en coagulant (Ccoag)

- ✓ La courbe montre une forte pente décroissante.
- ✓ Plus la concentration en coagulant augmente de -1,0 (25mg/l) à 1,0 (35mg/l), plus la turbidité diminue de façon quasi-linéaire. C'est pourquoi le logiciel sélectionne la valeur maximale 1 (35mg/l) pour minimiser la turbidité.

Effet de la concentration en floculant (Cfloc)

- ✓ La pente est également décroissante, mais beaucoup plus douce (faible inclinaison).
- ✓ L'augmentation du floculant permet de diminuer légèrement la turbidité. Le minimum est atteint à la borne maximale 1,0, bien que ce facteur semble avoir un impact moins critique (moins sensible) que le coagulant dans cette zone.

Effet du pH

- ✓ La courbe présente une forme quadratique (parabolique inversée).
- ✓ La turbidité augmente fortement lorsque le pH passe de -1,0 (6) vers 1,0 (8). Pour obtenir la turbidité la plus basse possible, il faut se positionner à la valeur la plus faible testée, soit -1,0 (6).

Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer les performances du procédé de traitement des eaux au niveau de la station de l'Ain Zada, en mettant l'accent sur l'efficacité de l'étape de coagulation-floculation et sur l'optimisation des paramètres opératoires à l'aide d'un plan d'expériences de type Box–Behnken.

Les résultats expérimentaux ont montré une amélioration significative de la qualité de l'eau entre l'entrée et la sortie de la station. La turbidité a été réduite de valeurs initiales comprises entre 32,46 et 59,12 NTU à des valeurs comprises entre 2,63 et 3,22 NTU, soit un taux d'abattement supérieur à 93 %. Par ailleurs, les analyses microbiologiques ont révélé une absence totale dans l'eau traitée, traduisant l'efficacité globale de la chaîne de traitement.

L'analyse statistique du modèle quadratique obtenu a révélé une bonne adéquation avec les données expérimentales, avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 96,14 \%$) et un coefficient de détermination ajusté ($R^2 \text{ ajusté} = 89,2 \%$), confirmant la fiabilité du modèle développé pour l'explication de la réponse étudiée. Par ailleurs, l'analyse de variance (ANOVA) a mis en évidence la significativité des facteurs étudiés, notamment le pH, la dose de coagulant et la dose de floculant, ainsi que certaines interactions entre variables, confirmant leur influence sur la réponse.

L'optimisation par la méthodologie des surfaces de réponse a permis d'identifier les conditions optimales de coagulation-floculation, correspondant à un pH de 6, une dose de coagulant de 35 mg/L et une dose de floculant de 0 à 1 mg/L. Dans ces conditions, la turbidité minimale obtenue est de 10 à 12 NTU, confirmant l'amélioration des performances du procédé.

Enfin, cette étude confirme l'intérêt de l'approche statistique par plan d'expériences pour optimiser les procédés de traitement des eaux, en réduisant le nombre d'essais tout en maximisant la qualité des résultats obtenus. Elle constitue un outil efficace pour améliorer le contrôle et la gestion des paramètres opératoires en station de traitement.

Annexe

Annexe 1

Tableau de Mac gardy

Nombre de tubes donnant une réaction positive sur			NPP Dans 100 ml	Limites de confiance à 95%	
3 tubes de 10ml	3 tubes de 1ml	3 tubes de 0,1 ml		Limite inférieure	Limite supérieure
0	0	1	3	< 0,5	9
0	1	0	3	< 0,5	13
1	0	0	4	< 0,5	20
1	0	1	7	1	21
1	1	0	7	1	23
1	1	1	11	3	36
1	2	0	11	3	36
2	0	0	9	1	36
2	0	1	14	3	37
2	1	0	15	3	44
2	1	1	20	7	89
2	2	0	21	4	47
2	2	1	28	10	149
3	0	0	23	4	120
3	0	1	39	7	130
3	0	2	64	15	379
3	1	0	43	7	210
3	1	1	75	14	230
3	1	2	120	30	380
3	2	0	93	15	380
3	2	1	150	30	440
3	2	2	10	35	470
3	3	0	240	36	1300
3	3	1	460	71	2400
3	3	2	1100	150	4800

Annexe

ANNEXE 2

Les réactifs des analyses :

1. Les analyses chimiques :

1. L'ammonium NH_4 :

Réactifs :

Réactif I :

- Acide dichloroisocyanurique. 0.2 g
- Hydroxyde de sodium (NaOH).... 3.2g.
- H_2O distillée....q.s.p 100 ml.

Réactif II (coloré) :

- Trictrate de sodium. 130g
- Salicylate de sodium... 13g
- Nitroprulicate de sodium 0,097 g.
- H_2O distillée... ... 100 ml

2. Le nitrite NO_2

Réactif mixte :

- Sulfanilamide 40 g
- Acide phosphorique 50 ml
- N-1-Naphtyle éthyle diamine 2g
- Ajuster à 1000 ml avec eau distillée

3. Le nitrate NO_3

Réactifs

- Solution de salicylate de sodium à 0.5 % (renouveler toutes les 24 h).
- Solution d'hydroxyde de sodium 30 %.
- H_2SO_4 concentré.
- Tartrate double de sodium et de potassium.

4. Le sulfate SO_4

Annexe

Réactifs

Réactif (1) Solution stabilisante :

- Acide chlorhydrique (c)
- L'éthanol.200 ml.
- Chlorure de sodium150g.
- Glycérol100 ml.
- Eau distillée600 ml.

Réactif (2) Solution de chlorure de baryum

- Chlorure de baryum
- Acide chlorhydrique
- Eau distillée

5. La dureté totale

Réactifs :

- NH_4OH (10,1): 7g (NH_4Cl) 57 ml (NH_3) 100 ml H_2O
- Noire ériochrome
- EDTA N/50 : (0,9305g/250ml)

6. La dureté calcique

Réactifs :

- NaOH à 2 N
- Murexide ($\text{CH}_8\text{N}_6\text{O}_6$)
- EDTA

7. Le chlorure

Réactifs :

- Solution de nitrate d'argent à 0,01 N.
- Solution de chlorures à 71 mg/l.
- Indicateur coloré K_2CO_4 à 10 %.
- Pour le F :
 - Prendre 5 ml de la solution mère à 71mg/l.
 - Ajouter 2ml de l'indicateur coloré.

Annexe

- Titrer par l'AgNO₃ jusqu'au virage (rouge brique).

$$F = \frac{1}{V_{AgNO3}}$$

8. La matière organique MO

Réactifs :

- Acide sulfurique dilué H₂SO₄
- Permanganate de potassium (KMnO₄) à 0,01N : 0,316g 100ml H₂O
- Acide oxalique 0,01N

9. Le titre alcalimétrique TAC

Réactifs :

- Acide chlorhydrique ou sulfurique 0,02 N
- Solution de vert de bromocrésol et de rouge de méthyle :
 - Vert de bromocrésol 0,2g -Rouge de méthyle 0,015g –Ethanol à 90% q.s.p. 100cm³
 - Eau dé-ionisée exempte d'anhydride carbonique libre (par ébullition de 15min)

2. Les analyses bactériologiques

Matériel utilisé

Verreries

- ✓ Flacons en verre de 250 ml, avec bouchon à vis métallique
- ✓ Pipettes graduées : 1 ml, 2 ml, 10 ml o Tubes à essais stériles
- ✓ Lames, Lamelles
- ✓ Pipettes Pasteur
- ✓ Becher
- ✓ Epprouvettes graduées

Appareillages

- ✓ Autoclave.
- ✓ Bec benzène.
- ✓ Pipettes stériles à usage unique.
- ✓ Etuve de 36 ±2 °C.

Annexe

- ✓ Etuve de 22 ± 2 °C.
- ✓ Bain marie.
- ✓ Compteur de colonies.
- ✓ Membranes filtrantes porosité $0,45\mu\text{m}$, diamètre 47 mm, $0,22\mu\text{m}$
- ✓ Rampes de filtration avec pompe et fiole à vide
- ✓ Frigo

Outils

- ✓ Anse de platine.
- ✓ Boîtes de Pétri stériles.
- ✓ Pince.
- ✓ Portoirs.

Réactifs et milieux

- Gélose lactosée au TTC et à l'heptadécylsulfate de sodium.
- **Gélose de Slanetz et Bartley** : C'est un milieu d'isolement gélosé très sélectif des entérocoques. Il contient de l'azide de sodium inhibiteur de la flore secondaire.
- **Gélose T.G.E.A** : est un milieu d'isolement et de dénombrement des bactéries aérobies revivifiabiles. Elle est composée de peptone de caséine, de glucose et d'extrait de viande
- **Gélose base Viande-Foie** (ou par défaut Gélose Tryptose-Sulfite) pour le dénombrement des bactéries anaérobies sulfito-réductrices, notamment les *Clostridium*.
- **TSA** (Gélose tryptonée au soja)
- **BCPL** milieu de base non sélectif pour l'isolement des bactéries
- **Bouillon de Rothe** : est utilisé pour effectuer le test présomptif de recherche et de dénombrement des entérocoques
- **Le bouillon de Schubert** est un milieu confirmatif utilisé pour la recherche d'*Escherichia coli*.
- **Le milieu EVA de Litsky** est un milieu sélectif utilisé pour la confirmation des streptocoques fécaux (entérocoques). La présence d'azide de sodium et de violet d'éthyle inhibe la majorité des autres bactéries et favorise le développement des entérocoques.