

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

*Université Abderrahmane Mira-BEJAIA*  
*Faculté de Technologie*  
*Département de Génie des Procédés*

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

### Master

En Génie des Procédés

Option : Génie des Procédés de l'Environnement

Thème

**Etude de la coagulation-floculation des eaux du puits de forage d'IBOURASSEN optimisé par plans d'expérience**

**Présenté par :**

Meriem MAZOUZ  
Zina FEREDJ

**Encadreur :** Mme H. BELKACEMI

**Devant le jury :**

**Nom et prénom :**

Mr M. AZZOUG

**Président**

Mme Z. BOUARICHE

**Examinatrice**

**Année Universitaire : 2018/2019**

## **Remerciements**

*Remercie en premier lieu **ALLAH** le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il nous a donné pour l'achèvement de ce mémoire, il a été et sera toujours à côté de nous pour réussir à terminer notre travail.*

*La réalisation de ce travail n'aurait pu être menée à terme sans le support continu de notre encadreur **Mme. H. BELKACEMI**. Nous désirons lui adresser un remerciement tout particulier pour ses précieux commentaires et ses conseils pertinents, qui nous ont énormément aidées tout au long des différentes étapes menant à l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier vivement les membres du jury **Mr M. AZZOUQ**  
**Mme Z. BOUARICHE**. De nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à la soutenance.*

*Nous adressons également nos remerciements à toute l'équipe du Laboratoire de Méthodes Physiques d'Analyse, du Laboratoire de l'environnement et au personnel technique du bloc 11, du département de génie des procédés, de la faculté de technologie, de l'université de Bejaia.*

*A l'équipe de laboratoire de microbiologie de l'université de Bejaia en particulier **Mme L. Ben Sidhoum** pour sa précieuse aide et son dévouement à la tâche, qui nous ont conduit à la réussite de nos tests microbiologiques. Sans son concours, nous n'aurions jamais pu terminer notre étude.*

*Bien sûr, nous aimerons adresser nos remerciements à notre famille et à nos amis, pour leur soutien moral et financier.*

*Finalement, nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire; et tous les personnes qui ont participé de près ou de loin à la Concrétisation de ce mémoire.*

# *Dédicaces*

*Avant tout, je dois remercier Dieu le tout puissant qui m'a donné l'envie et la force pour mener à terme ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de mes parentes*

*A mes frères et mes sœurs*

*A toute ma famille*

*A Ma copine **Meriem** et sa famille*

*Tous mes amis et tous ceux que je connais qui m'ont souhaité la réussite*

*Et à toute la promotion 2019 de Génie de l'Environnement, à qui je souhaite une bonne réussite.*

*Zina*

# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail:

A mes parents qui m'ont toujours soutenue dans tous mon cursus et à qui je serais éternellement  
reconnaissante.

Que dieu puisse leur accorder longue vie afin qu'ils puissent trouver en moi toute gratitude et l'attention  
voulue.

A mes chers frères et ma chère sœur Chahrazed

Et ma belle sœur nawel

*A Ma chère copine **Zina** et sa famille*

*A mes tantes, Mes cousines ,pour leurs encouragements, leurs aides et leur amour*

*A toutes mes amies Siham ,Chafie , Biba , Akila , Meriem , nouria ,Siham et à tous ceux qui ont  
contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.*

*Et à toute la promotion 2019 de Génie de l'Environnement, à qui je souhaite une bonne réussite*

*Meriem*

# Liste des figures

---

## CHAPITRE I : Revue bibliographique

Figure I.1: Cycle de l'eau d'après .....	2
Figure I.2 répartition de l'eau sur la terre (toupanec 2006).....	3
Figure I 3: Etapes de traitement des eaux brutes .....	16
Figure I.4 : Le fonctionnement d'un adoucisseur.....	20
Figure I.5 : le principe de l'adoucissement de l'eau .....	21
Figure I.6:Schéma de membrane sélective .....	22
Figure I.7 : Classification des procédés barométriques membranaires selon la taille de Séparation .....	22
Figure I.8 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse .....	25

## CHAPITRE II : Plans d'expériences

Figure II.1: Schéma du principe des plans.....	27
Figure II.2 : Variables centrées réduites .....	29
Figure II.3: Disposition des points expérimentaux d'un plan $2^2$ (a) et $2^3$ (b) .....	31

## CHAPITRE III : Méthodologie et protocoles expérimentaux

Figure III.1 : Situation géographique du puits de forage d'IBOURASSEN.....	37
--	----

## CHAPITRE IV : Résultats et discussion

Figure IV.1 : Histogramme montrant les variations du pH des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.....	76
Figure IV.2 : Histogramme montrant les variations de la conductivité des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.....	77
Figure IV.3 : Histogramme montrant les variations de la température des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.....	78
Figure IV.4 : Histogramme montrant les variations du TAC des essais	

## Liste des figures

---

du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.....	79
Figure IV.5 : Histogramme montrant les variations du TH des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.....	80
Figure IV.6 : Histogramme montrant les variations du $\text{TH}_{\text{Ca}^{2+}}$ des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.....	81
Figure IV. 7 : Histogramme montrant les variations de $\text{Cl}^-$ des essais du plan factoriel Pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.....	82
Figure IV.8 : Histogramme montrant les variations de la silice des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.....	83
Figure IV.9: courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement de la conductivité par le plan factoriel à 3 facteurs.....	86
Figure IV.10 : courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement du TH par le plan factoriel à 3 facteurs.....	89
Figure IV.11 : courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement du $\text{TH}_{\text{Ca}}$ par le plan factoriel à 3 facteurs.....	91
Figure IV.12: courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement de $\text{Cl}^-$ par le plan factoriel à 3 facteurs .....	93
Figure IV.13: courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement de silice par le plan factoriel à 3 facteurs.....	96

# Liste des tableaux

---

## CHAPITRE I : Revue bibliographique

Tableau I.1 : Comparaison entre les eaux de surface et les eaux souterraines .....	5
Tableau I.2: Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité.....	9
Tableau I.3 : Les différents types de dégrillage .....	16
Tableau I.4 : Caractéristiques des différents procédés de séparation membranaire.....	25

## CHAPITRE II : Plans d'expériences

Tableau II.1: Matrice de planification des expériences d'un plan $2^3$ .....	32
--	----

## CHAPITRE III : Méthodologie et protocoles expérimentaux

Tableau III-1 : La minéralisation des eaux en fonction de la conductivité électrique.....	41
Tableau III .2: Les paramètres de Langelier.....	44
Tableau III.3 : composition de la Gélose de dénombrement PCA (pour 1L).....	59
Tableau III.4 : composition de la Gélose lactosée au désoxycholate (LDC) (pour 1L).....	60
Tableau III.5 : composition de la gélose glucosée à l'oxytétracycline (OGA) (pour 1L).....	61
Tableau III.6 : composition de la gélose (MEB) (pour 1L).....	62
Tableau III.7 : composition de bouillon lactosé (BCP) (pour 1L).....	62
Tableau III.8 : domaines des limites des facteurs du plan factoriel pour la coagulation-floculation de l'eau brute d'Ibourassen.....	66
Tableau III.9 : Matrice du plan factoriel à 3 facteurs pour la coagulation-floculation de l'eau brute d'Ibourassen.....	67
Tableau III.10 : domaines des valeurs des deux paramètres du plan factoriel de l'optimisation du procédé de coagulation-floculation de l'eau brute d'Ibourassen.....	68

## CHAPITRE IV :Résultats et discussion

## Liste des tableaux

---

Tableau(IV.1) : Les résultats obtenus des différents paramètres physico-chimiques.....	70
Tableau(IV.2) : Les résultats obtenus des différents tests microbiologiques .....	72
Tableau IV.3 : pH de l'eau brute après le traitement.....	75
Tableau IV.4 : La conductivité de l'eau brute après le traitement.....	76
Tableau IV.5 : La température de l'eau brute après le traitement.....	77
Tableau IV.6 : TA de l'eau brute après le traitement.....	78
Tableau IV.7 : TAC de l'eau brute après le traitement.....	79
Tableau IV.8 : TH de l'eau brute après le traitement.....	80
Tableau IV.9 : TH Ca <sup>2+</sup> de l'eau brute après le traitement.....	81
Tableau IV.10: les chlorures Cl <sup>-</sup> de l'eau brute après le traitement.....	82
Tableau IV.11 : la silice de l'eau brute après le traitement.....	82
Tableau IV-12 : domaine des valeurs des facteurs à deux niveaux.....	83
Tableau IV.13 : Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ ) .....	84
Tableau IV.14 : Résultats statistiques de l'optimisation du rendement du paramètre de conductivité par le plan factoriel .....	85
Tableau IV.15: Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ ) .....	87
Tableau IV. 16 : Résultats statistiques de l'optimisation du rendement de TH par plan factoriel à 2 niveaux.....	87
Tableau IV.17 : Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ ) .....	89
Tableau IV.18 Résultats statistiques de l'optimisation du rendement du paramètre TH <sub>Ca</sub> par le plan factoriel.....	90
Tableau IV.19 : Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ ) .....	92
Tableau IV.20 : résultats du contrôle statistique pour le paramètre Cl par le plan factoriel à 2 niveaux.....	92
Tableau IV.21 : Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ ) .....	94
Tableau IV.22: résultats du contrôle statistique du rendement de silice par le plan factoriel...95	

## Liste des abréviations

---

°C : Degré Celsius ;  
Ca (OH)<sub>2</sub> : chaux ;  
Cl<sup>-</sup> : Chlorure ;  
E-coli : Escheri chia coli ;  
EDTA-Na<sub>2</sub> : Ethylène diamine tétra acétique disodique ;  
°F : Degré français ;  
IP : Indice de permanganate ;  
KMnO<sub>4</sub> : Permanganate de Potassium ;  
LSI : Indice de saturation de Langelier ;  
MES : Matière en suspension ;  
NaOH : Hydroxyde de sodium ;  
NET : Noir erriochrome ;  
OMS : Organisation mondiale de la santé ;  
pH : Potentiel d'Hydrogène ;  
Ppm : Partie par million ;  
SAA : Spectrophotométrie d'adsorption atomique ;  
Si O<sub>2</sub> : Silice ;  
Rs : Résidu sec ;  
TA: Titre alcalimétrique ;  
TAC: Titre alcalimétrique ;  
TH: Titre hydrométrique ;  
THca: Titre hydrométrique calcique ;  
THMg : Titre hydrométrique magnésien ;  
UV-visible: Ultra violet visible ;  
  
DDL: degré de liberté ;  
  
F: Fisher ;  
t: Student ;  
UTN : Unité Nephelométrique de Turbidité ;  
  
PCA: plate count agar ;  
  
BCP :bouillon lactose au pourpre de bromocrésol;  
  
OGA: oxytéracyline - gélose glucosée ;  
  
LDC :gélose lactosée au désoxycholate.

# Sommaire

---

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

SOMMAIRE

INTRODUCTION ..... 1

## CHAPITRE I : Revue bibliographique

I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition de l'eau potable.....	2
I.3. Le cycle de l'eau.....	2
I.4. Répartition de l'eau sur la terre .....	3
I.5. Les eaux d'approvisionnement .....	4
I.5.1 Les eaux de surface .....	4
I.5.1.1 Les eaux de rivière partie amont .....	5
I.5.1.2 Les eaux de rivière partie aval.....	5
I.5.1.3 Les eaux de lac.....	5
I.5.2. Les eaux souterraines.....	6
I.5.3. Comparaison entre les eaux de surface et souterraines.....	6
I.6 Qualité des eaux.....	7
I.6.1 Qualité de l'eau d'alimentation.....	7
I.6.2 Qualité des eaux souterraines.....	7
I.7. Pollution de l'eau.....	7
I.8. Paramètres de la qualité de l'eau.....	8
I.8.1 Paramètres organoleptique.....	8
1. Couleur .....	8
2. L'odeur.....	9
3. Goût et saveur .....	9
I.8.2.1. Paramètres physiques .....	9
1. Température.....	9
2. Le potentiel hydrogène (pH).....	10
3. Matière en suspension (MES).....	10
4. Conductivité électrique .....	10
5. Turbidité .....	11

# Sommaire

---

6. Minéralisation globale.....	11
6. Résidu sec.....	11
I.8.2.2. Paramètres chimique .....	12
I.8.2.3 paramètres microbiologiques.....	16
I.9.Procédés de traitement des eaux brutes .....	18
I.9.1. Prétraitement.....	19
1.Dégrillage.....	19
2.Tamisage.....	19
3. Le dessablage.....	20
4. La clarification.....	20
5.Désinfection.....	22
I.10.Traitement par échange d'ion et adoucisseur .....	22
I.11.Traitement par la technologie des membranes.....	24
1 principe.....	24
2.Les techniques membranaires à gradient de pression .....	25
2.1.Microfiltration tangentielle .....	26
2.2. L'ultrafiltration.....	26
2.3.La nanofiltration .....	27
2.4.L'osmose inverse .....	27

## **CHAPITRE II : Plans d'expériences**

II.1 Présentation des plans d'expériences.....	30
II.2 Principe.....	31
II.3 Formules de codage .....	31
II.4 Modélisation par les plans d'expériences .....	32
II.4.1.Plans factoriels complets à deux niveaux ( $2^k$ ) .....	34
II.4.1.1 Calcul des coefficients du modèle .....	36
II.4.1.2 Analyse statistique .....	35
II.1.2.3 Coefficient de détermination .....	38
II.1.2.4 Analyse des résidus .....	39
II.4.2 Plans d'expériences pour surfaces de réponses .....	39

# Sommaire

---

## CHAPITRE III : Méthodologie et protocoles expérimentaux

III.1.Sources d'eau utilisée pour la production de l'eau ultra pure à CEVITAL.....	40
III.1.1.Présentation du puits de forage d'IBOURASSEN.....	40
III.2.Prélèvement des échantillons d'eau .....	41
III.3.Méthodes d'analyses.....	42
III.3.1.Analyses physico-chimiques.....	42
III.3.1.1.Mesure de la température .....	42
III.3.1.2.Mesure du potentiel d'hydrogène (pH) .....	43
III.3.1.3. Mesure de la conductivité électrique (CE) .....	43
III.3.1.4. Détermination des matières en suspension MES.....	45
III.3.1.5. Résidu sec.....	46
III.3.1.6. Indice de Langelier ou indice de saturation .....	47
III.3.2.Paramètre physico-chimique étudiés (Titrimétrie ou volumétrie) .....	48
III.3.2.1.Détermination de l'alcalinité (TA et TAC).....	48
III.3.2.2.Dosage de la dureté totale (TH) .....	50
III.3.2.3.Détermination de la dureté calcique (TH <sub>Ca</sub> ) .....	51
III.3.2.4.Détermination de la dureté magnésienne (TH <sub>Mg</sub> ) .....	52
III.3.2.5. Dosage des chlorures (Cl <sup>-</sup> ) par la méthode de « MOHR » .....	53
III.3.3.Analyse par spectrophotométrie (UV-visible).....	54
III.3.3.1. Dosage de la silice (SiO <sub>2</sub> ) .....	55
III.3.4. Analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA).....	60
III.3.4.1. Dosage du Fer par SAA .....	60
III.3.4.2. Dosage du plomb par SAA .....	61
III.4. Analyses bactériologiques.....	61
III.4.1. Flore totale aérobies mésophiles (FTAM) .....	66
III.4.2.Coliforme totaux et coliformes thermo tolérant (E.coli) .....	67
III.5. Traitement de l'eau brute .....	67
III.5.1.Coagulation-floculation.....	68
III.5.1.1. La coagulation .....	68
III.5.1.2. La floculation .....	68
III.5.1.3. JART-TEST .....	69

# Sommaire

---

## CHAPITRE IV : Résultats et discussion

IV -1-Analyses physico-chimiques et microbiologique de l'eau brute .....	73
IV.2 Modélisation et optimisation par plan d'expérience .....	77
IV.2.1. Influence des conditions opératoires sur l'étude de la floculation coagulation des eaux ....	77
a. Temps de coagulation-floculation .....	77
b. Potentiel d'hydrogène (pH) .....	77
c. Masse du chitosane .....	78
IV.2.2.Les résultats des paramètres physicochimiques après le traitement.....	78
a. Résultats de contrôle du pH après le traitement .....	78
b. Résultats de contrôle de conductivité après le traitement.....	79
c. Résultats de contrôle de température après le traitemente .....	80
d . Résultats de contrôle de l'alcalinité après le traitement .....	81
e. Résultats de contrôle de TAC après le traitement.....	82
f. Résultats de contrôle de TH après le traitement .....	83
e. Résultats de contrôle de $\text{THCa}^{2+}$ après le traitement .....	83
f. Résultats de contrôle de chlorures après le traitement .....	84
i. Résultats de contrôle de la silice après le traitement.....	84
IV.2.3. Optimisation des facteurs influants et modélisation du rendement d'enlèvement .....	85
IV.2.2 Elaboration du modèle de deuxième degré.....	86
CONCLUSION.....	99
REREFERENES BIBLIOGRAPHIQUE	
ANNEXE	
RESUME	

# Introduction générale

---

L'eau est un élément essentiel de la vie biologique. Non seulement, elle est un nutriment vital, mais elle est aussi impliquée dans de nombreuses fonctions physiologiques essentielles telles que la digestion, l'absorption, la thermorégulation et l'élimination des déchets [1]. Sans cette matière simple et complexe en même temps, la vie sur terre n'aurait jamais existé donc c'est un élément noble qu'on doit protéger pour les générations futures [2].

Une eau destinée à la consommation humaine est potable lorsqu'elle est exemptée d'éléments chimiques et biologiques susceptibles à plus ou moins long terme à la santé des individus [3]. Selon l'OMS (2005), chaque année 1,8 millions de personnes dont 90% d'enfants de moins de cinq ans, vivant pour la plupart dans les pays en développement meurent de maladies diarrhéiques (y compris du choléra); 88% des maladies diarrhéiques sont imputables à la mauvaise qualité de l'eau, à un assainissement insuffisant et à une hygiène défectueuse. Par conséquent, et en fonction des caractéristiques de l'eau brute destinée à la production d'eau potable, la mise en place de traitements spécifiques s'avère le plus souvent nécessaire afin de répondre aux exigences réglementaires établies par les organismes de la santé publique [4].

Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. En Algérie, l'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants liés à l'essor démographique et le développement accéléré des activités économiques, notamment l'agriculture en Irrigation et l'industrie [5].

L'objectif de ce travail consiste à faire des analyses physico-chimiques et bactériologiques pour déterminer la qualité de l'eau brute du puits de forage d'Ibourassen et trouver les solutions pour effectuer des traitements moins coûteux. Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres suivis d'une conclusion générale.

Après une introduction, le premier chapitre est un aperçu global qui rappelle les généralités sur les eaux, en montrant leurs caractéristiques organoleptiques, physico-chimiques et bactériologiques.

Le deuxième chapitre est consacré aux plans d'expériences. Cette méthode statistique permet de concevoir un modèle mathématique, par le traitement d'un nombre minimal d'essais expérimentaux.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation du matériel et méthodes, qui seront mis en œuvre, ainsi qu'aux différents essais optimisés dans le procédé de traitement par coagulation-floculation, de l'eau du puits de forage d'Ibourassen.

Le quatrième chapitre englobe l'essentiel des résultats et des discussions.

Le mémoire se termine par une conclusion générale.

### **I.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous rappelions les bases du cycle de l'eau, l'importance et les sources de l'eau, ses caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour le traitement. Connaître l'eau permet une meilleure gestion de cette ressource naturelle et précieuse, et peut aider à trouver la meilleure méthode pour le traiter et produire une eau potable de haute qualité.

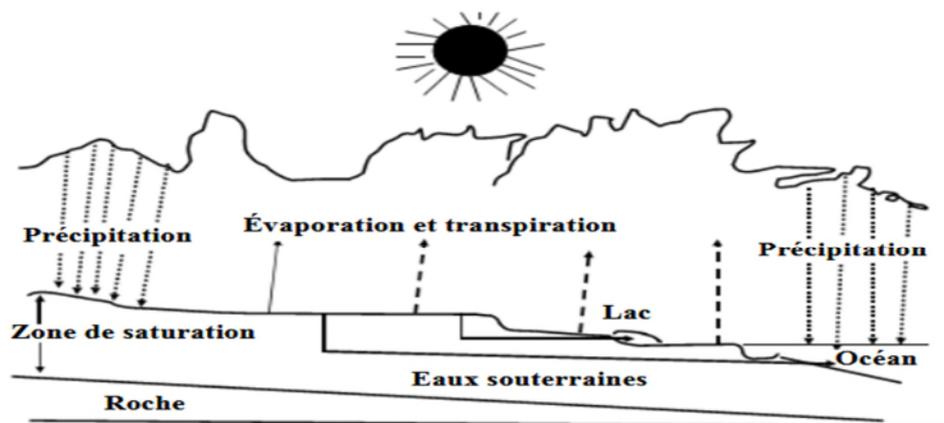
### **I.2. Définition de l'eau potable**

Elle peut être définie comme l'eau qui est sans danger pour l'usage domestique, y compris pour boire, et la préparation des aliments; elle doit avoir les propriétés organoleptiques, physico-chimiques et biologiques qui satisfont les besoins biologiques de l'homme. Aussi elle doit être sans couleur ni odeur, ni goût. Ces critères sont déterminés par l'absence de bactéries, de virus et de toute substance toxique, et la présence de sels physiologiquement nécessaires (calcium, magnésium, sodium et potassium) à des concentrations normalisées [6].

### **I.3. Le cycle de l'eau**

L'eau trouve presque partout sur la terre et elle est vitale pour tous les organismes vivants connus, près de 70% de la surface de la terre est recouverte d'eau, essentiellement sous forme d'océans. Une étendue d'eau peut être un océan, une mer, un lac, un étang, une rivière, un ruisseau, un canal. La circulation de l'eau au sein des différents compartiments terrestres est décrite par son cycle biogéochimique, le cycle de l'eau [7].

L'hydrosphère chauffée par l'énergie solaire, s'évapore et conduit à la présence d'eau dans l'atmosphère. Cette eau, à la suite d'un refroidissement de l'air, se condense en gouttes ou cristaux de glace et se trouve précipitée sous forme de pluie, neige ou grêle sur lithosphère à la surface de laquelle approximativement  $\frac{1}{4}$  pénètre,  $\frac{1}{4}$  ruisselle, quant au  $\frac{1}{4}$  restants, il s'évapore à son tour [8].



**Figure I.1:** Cycle de l'eau d'après [6]

#### **I.4. Répartition de l'eau sur la terre**

L'eau est de loin le liquide le plus abondant sur la terre dont elle recouvre les 72% de la surface, représentant un volume total estimé à  $1,4.10^9 \text{ Km}^3$ .

Les mers et les océans représentent 97,4% de la totalité des eaux terrestres.

Les quatre cinquièmes des eaux dites douces sont constitués par les sommets enneigés et les glaciers et la totalité du cinquième restant est localisé dans des nappes phréatiques.

L'eau indispensable à la survie de l'espèce vivante terrestre, représente donc moins d'un pour cent de l'eau douce soit environ 0,014% de l'eau totale.

C'est pourquoi il est impératif que ce bien de l'humanité soit protégé et utilisé avec le plus grand respect dans le sens de développement durable, défini comme le développement qui couvre les besoins de la société actuelle sans détruire pour autant les possibilités des générations futures de découvrir leur propre besoin [9].

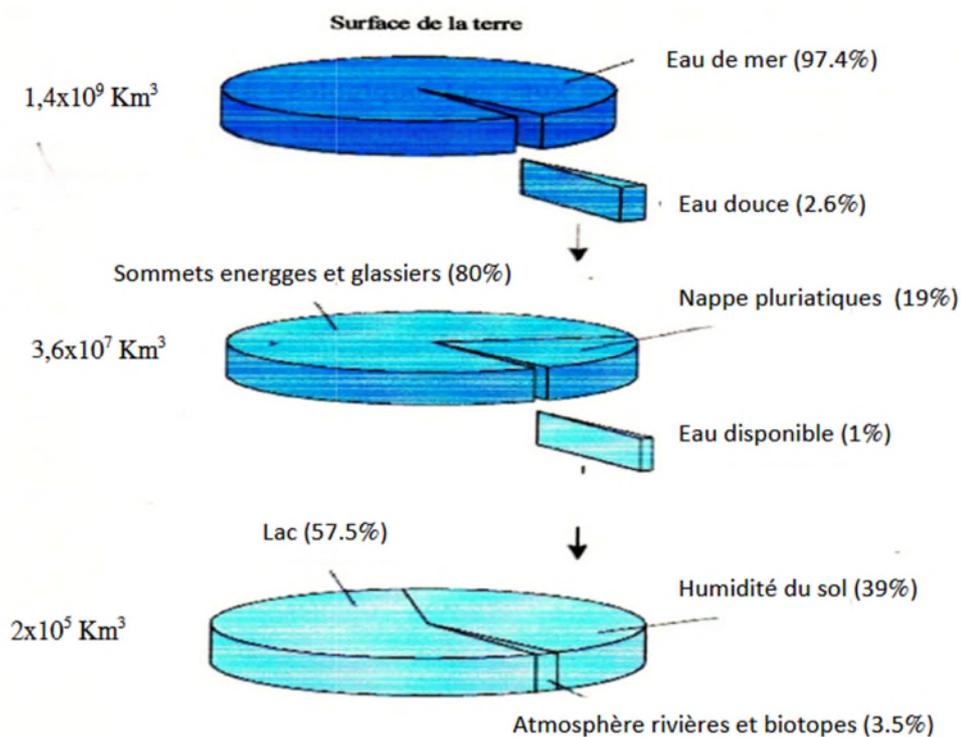


Figure I.2 répartition de l'eau sur la terre (toupanec 2006)

### I.5. Les eaux d'approvisionnement

Les réserves disponibles des eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltration, nappes), des eaux de surface stagnantes (lacs, retenues de barrages) ou en écoulement (rivières) [10].

#### I.5.1 Les eaux de surface

Les eaux de surface sont des eaux qui circulent ou qui sont stockées à la surface des continents. Elles ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement (fleuves, rivières, barrages, mares, marigots) [10].

En plus, ces eaux superficielles doivent subir un traitement en plusieurs étapes pour être utilisées pour la boisson et les usages domestiques. Elles ne peuvent être utilisées sans traitement. De plus, pour envisager d'alimenter des populations à partir d'eaux de surface, il faut éviter les conditions favorisant l'érosion des sols, les conditions non hygiéniques et les pollutions accidentelles et chroniques [11].

On peut répartir les eaux de surface en trois catégories:

- Les eaux de rivière partie amont;
- Les eaux de rivière partie aval;
- Les eaux de lac [12].

#### **I.5.1.1 Les eaux de rivière partie amont**

L'amont d'une rivière est en général situé dans une région montagneuse, où la densité de la population est faible et les industries pratiquement inexistantes. Les caractéristiques de ces eaux sont comme suit:

- La turbidité élevée;
- La contamination bactérienne est faible;
- La température froide et l'indice de couleur est faible [12].

#### **I.5.1.2 Les eaux de rivière partie aval**

L'aval d'une rivière est en généralement situé dans une région où la population est dense, l'agriculture est développée et les industries plus ou moins nombreuses. Les eaux sont de moins bonne qualité et plus difficiles à traiter qu'en amont. Les caractéristiques de ces eaux sont comme suit:

- La contamination bactérienne élevée;
- Une contamination organique et minérale élevée et l'indice de couleur souvent élevé;
- Indice de couleur peuvent être élevé [12].

#### **I.5.1.3 Les eaux de lac**

Les lacs peuvent être considérés comme des grands bassins naturels de décantation dont le temps de rétention est très long. Leurs eaux sont donc caractérisées par une faible turbidité et une contamination bactérienne habituellement peu importante. Ces caractéristiques varient très lentement au cours de l'année [12].

#### **I.5.2. Les eaux souterraines**

Les eaux souterraines sont une ressource cachée que l'on a tendance à oublier. À l'échelle du cycle hydrologique, les eaux souterraines ne représentent qu'une faible partie de toute les

eaux marines et océaniques, elles représentent alors une fraction importante des eaux douces continentales [13].

L'eau souterraine est l'eau qui existe dans les pores, les fissures des roches et dans les sédiments sous la terre et aussi sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, et qui transite plus ou moins rapidement [14].

La qualité de l'eau dépend du terrain car il y a un équilibre et un échange de matières entre le terrain et l'eau qui s'y trouve.

### **I.5.3. Comparaison entre les eaux de surface et souterraines**

**Tableau I.1** : Comparaison entre les eaux de surface et les eaux souterraines [4].

<b>Caractéristiques</b>	<b>Eaux de surface</b>	<b>Eaux souterraines</b>
Température	Variable suivant les saisons	Relativement constante
Turbidité, MES	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle
Couleur	Liée surtout aux MES (argiles, algues)	Liée surtout aux matières en solution (acide humique par exemple)
Fe et Mn divalent (à l'état dissous)	Généralement absents sauf en profondeur des pièces d'eau en état d'eutrophisation.	Généralement présents Sensiblement
Minéralisation globale	Variable en fonction des terrains, des précipitations, des rejets.	Constante en général nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région
CO2 agressif	Généralement absent	Souvent présent en grande quantité.
Oxygène dissous	Le plus souvent au voisinage de la saturation. Absent dans le cas d'eaux très polluées.	Absent dans la plupart du temps.
H2S	Généralement absent.	Souvent présent
NH4	Peu abondant en général	Teneur parfois élevée.
Nitrates	Présents dans les eaux de pays développés mais susceptibles de disparaître rapidement après suppression de la source	Généralement absents, mais une pollution accidentelle subsiste beaucoup plus longtemps.
Micropolluants minéraux et organiques	Présents dans les eaux de pays développés mais susceptibles de disparaître rapidement après suppression de la source	Ferro bactéries fréquentes.
Eléments vivants	Bactéries (dont certaines pathogénies), virus, plancton.	

## **I.6 Qualité des eaux**

### **I.6.1 Qualité de l'eau d'alimentation**

Qualité de l'eau d'alimentation sont considérée souvent comme un symbole de pureté, l'eau est progressivement devenue le produit alimentaire le plus surveillé,

L'eau, ressource naturelle indispensable à la vie, la santé, l'accès. Elle constitue d'un autre côté le vecteur de nombreuses maladies à transmission hydrique comme, la tuberculose, la fièvre typhoïde, le choléra et les diarrhées, pour ne citer que ces quelques maladies qui tuent des milliers de personnes chaque année à travers le monde [15].

### **I.6.2 Qualité des eaux souterraines**

Dans la réalité, les eaux souterraines sont rarement stables tout au long de l'année. Il faut étudier leur évolution surtout pendant les précipitations importantes où elles peuvent devenir troubles ou même être souillées par une nappe phréatique d'une rivière voisine. Elles peuvent être également polluées à partir du sol par des épandages de pesticides et des rejets d'eau résiduaux d'origines animale ou humaine. Si cette pollution est plus rare et plus limitée d'ordinaire dans les eaux souterraines que dans les eaux de surfaces, les accidents ont un effet plus durable sur la première, étant donné les faibles vitesses de percolation et la teneur à retrouver l'équilibre perdu [16]

## **I.7.Pollution de l'eau**

La pollution de l'eau est actuellement placée en tête des problèmes de l'environnement car l'eau est une interface entre l'air et le sol.

Une eau est dite polluée lorsque son équilibre est modifié de façon durable par l'apport en quantités très importantes des substances plus ou moins toxiques, d'origines naturelles ou issues d'activités humaines.

L'activité humaine, qu'elle soit industrielle, urbaine ou agricole, produit une quantité de substance polluantes de toute nature qui sont à l'origine de différents types de pollution qui peuvent être permanentes (rejets domestiques d'une grande ville par exemple), périodique ou

encore accidentelles ou aiguës, à la suite du déversement intempestif des produits toxiques d'origine industrielle ou agricole, ou de lessivage des sols urbains lors de fortes pluies [17].

## **I.8. Paramètres de la qualité de l'eau**

L'eau potable doit obligatoirement respecter les seuils réglementaires de différents paramètres, divisés en différents groupes: les qualités organoleptiques (odeur, couleur, saveur), les éléments microbiologiques (virus, bactéries), les substances indésirables (nitrate, fluor), toxiques (chrome, plomb), les pesticides ainsi que la composition naturelle de l'eau (pH, taux de calcium,...) [18].

### **I.8.1 Paramètres organoleptique**

La transparence de l'eau dépend de la longueur d'onde de la lumière qui la traverse. Si l'ultraviolet passe bien, l'infrarouge, si utile au point de vue physique et biologique, pénètre à peine.

#### **1.Couleur**

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparentes sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité [17].

#### **2. L'odeur**

Toute odeur est un signe de pollution ou de présence de matières organiques en décomposition. L'odeur peut être définie comme :

- L'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles.
- La qualité de cette sensation particulière provoquée par chacune de ces substances [17].

### **3. Goût et saveur**

Le goût peut être défini comme l'ensemble des sensations gustatives, olfactives et de sensibilité chimique commune perçue lorsque la boisson est dans la bouche. La saveur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues à la suite de la stimulation par certaines substances solubles des bourgeons gustatifs [17].

### **I.8.2.paramètres physio chimique**

Les propriétés physiques et chimiques les plus intéressantes pour le traitement de l'eau sont les suivantes:

#### **I.8.2.1. Paramètres physiques**

##### **1. Température**

C'est une caractéristique physique importante. Elle joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, et aussi la détermination du pH. Sa mesure est effectuée par le thermomètre. D'une façon générale, la température des eaux superficielles est influencée par la température de l'air, par ailleurs les eaux souterraines ont une température plus faible en raison de la profondeur [20].

##### **2. Le potentiel hydrogène (pH)**

Ce paramètre est très important dans notre étude car non seulement il contrôle la corrosion mais aussi montre la stabilité de l'eau.

Il faut noter que l'action bactéricide du chlore augmente ou tend à augmenter pour les valeurs faibles du pH de l'eau, en particulier une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> produisant une baisse du pH ; pour les eaux ayant une alcalinité, l'action du chlore sera plus grande pour les eaux contenant plus de CO<sub>2</sub> que celle en contenant moins [21].

### **3. Matière en suspension (MES)**

Il s'agit des matières non solubilisées dans l'eau. Elles comprennent toutes les matières minérales ou organiques. Elles incluent les argiles, les sables, les limons, les matières organiques et minérales de faible dimension, le plancton et autres micro-organismes de l'eau. La quantité de matières en suspension varie selon les saisons et le régime d'écoulement des eaux. Ces matières affectent la transparence de l'eau et diminuent la pénétration de la lumière, par conséquent, la photosynthèse. Par ailleurs, les matières en suspension peuvent accumuler des quantités élevées de matières toxiques (métaux, pesticides, huiles, hydrocarbures aromatiques...) [22].

### **4. Conductivité électrique**

La conductivité est une mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique, donc une mesure indirecte de la teneur de l'eau en ions (calcium, magnésium, sodium, nitrates, chlorures, sulfates, ...) et représente la salinité des eaux. Ainsi, plus l'eau contient d'ions, plus elle est capable de conduire un courant électrique et plus la conductivité mesurée est élevée [23].

### **5. Turbidité**

La turbidité désigne la teneur d'une eau en particules suspendues qui la troublent le degré de limpidité de l'eau. Elle représente l'un des principaux paramètres de détermination de la qualité de l'eau potable. En effet, la clarté et la transparence de l'eau sont l'image d'une haute qualité de l'eau pour la plupart des personnes [19].

### **6. Minéralisation globale**

La minéralisation de l'eau est en fonction de la géologie des terrains traversés. D'une façon générale, elle est plus élevée dans les eaux souterraines que dans les eaux superficielles. Les eaux très minéralisées, du fait de leur teneur en sels dissous, semblent bien contribuer à l'homéostasie de l'homme et surtout de l'enfant; cependant, elles peuvent poser des problèmes endocriniens très complexes [21].

**Tableau I.2:** Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité.

Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Minéralisation
Conductivité < 50	1,365079 * Conductivité à 20°C
50 < Conductivité < 166	0,947658 * Conductivité à 20°C
166 < Conductivité < 333	0,769574 * Conductivité à 20°C
333 < Conductivité < 833	0,71592 * Conductivité à 20°C
833 < Conductivité < 1000	0,458544 * Conductivité à 20°C
Conductivité > 1000	0,850432 * Conductivité à 20°C

Source : J.RODIER 2009.

## **6. Résidu sec**

Le résidu sec donne une information sur la teneur en substances dissoutes non volatiles (le taux des éléments minéraux). Suivant le domaine d'origine de l'eau cette teneur peut varier de moins de 100 mg/l (eaux provenant de massifs cristallins) à plus de 1000 mg/l [24].

### **I.8.2.2. Paramètres chimique**

#### **1. Alcalinité**

L'alcalinité d'une eau est essentiellement due à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus généralement à la présence d'hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes.

- le titre alcalimétrique T.A. d'une eau correspond à la somme des concentrations des ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et des ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ).

$$\text{T.A.} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \text{ (premier point équivalent)}$$

- le titre alcalimétrique complet T.A.C rend compte de la concentration d'une eau en ions carbonate  $\text{CO}_3^{2-}$  et en ions hydrogénocarbonate  $\text{HCO}_3^-$  [12].

$$\text{T.A.C.} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] \text{ (deuxième point équivalent) [25].}$$

## 2. Dureté de l'eau

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau est une grandeur reliée à la somme des concentrations en cations métalliques calcium, magnésium, aluminium, fer...etc. présents dans l'eau, les deux premiers cations ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) étant généralement les plus abondants. Comme le calcium est un des ions les plus abondants, il devient donc un bon indicateur de la dureté l'eau. Une eau à titre hydrotimétrie élevée est dit dure, dans le cas contraire il s'agit d'une douce [26].

## 3. Oxygène dissous (OD)

Les concentrations en oxygène dissous, constituent l'un des plus importants paramètres de la qualité des eaux pour la vie aquatique. Sa concentration dans un milieu aquatique varie en fonction de la température de l'eau, de la profondeur, de l'heure de la journée, de la concentration de la matière organique et des nutriments dans le milieu ainsi que de la quantité de plantes aquatiques, d'algues et de bactéries présentes. Cependant, il existe deux principaux phénomènes par lesquels l'oxygène dissous se retrouve dans l'eau; Les échanges avec l'atmosphère et La photosynthèse [27].

## 4. Ions majeurs

La minéralisation de la plupart des eaux est dominée par 8 ions, appelés couramment les majeurs. On distingue les cations : Calcium, Magnésium, Sodium, et Potassium, et anions : Chlorure, Sulfate, Nitrate, et bicarbonate. Les indications présentées dans ce paragraphe sont utiles pour interpréter les résultats d'analyses courantes (site internet).

### a. Les Cations

#### **a.1 Calcium**

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature de terrains traversés. Il existe surtout à l'état l'hydrogénocarbonate et en quantité moindre, sous forme de sulfates, chlorures, etc [28].

### **a.2 Magnésium**

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature ; il constitue environ 2.1% de l'écorce terrestre. La plupart de ses sels sont très solubles dans l'eau, même le carbonate peut être dissous jusqu'à 300 mg/l à 20°C. La teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées (calcaires, dolomitiques, du jurassique ou du trias moyen). Les valeurs les plus faibles sont relevées dans la plupart des eaux des massifs anciens. Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau ; sa teneur dépasse rarement 15mg/l. Il est présent sous forme de carbonates et d'hydrogencarbonates [28].

### **a.3 Sodium**

Le cation sodium ( $\text{Na}^+$ ) est très abondant sur la terre. On le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires (sable, argile, évaporite). La roche Halite (évaporite  $\text{NaCl}$ ) est le sel de cuisine. Il est très soluble dans l'eau. Le sodium est par contre généralement peu présent dans les roches carbonatées. Notons que les argiles peuvent être saturées en ions  $\text{Na}^{2+}$ , par le processus d'échange de bases [28].

### **a.4 Potassium**

Bien que dans les roches ignées la teneur en potassium soit presque aussi importante que celle du sodium, sa présence à peu près constante dans les eaux naturelles ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/l [28].

### **a.5 Fer**

Très répandu, le fer se classe au 4<sup>ème</sup> rang des éléments de la croûte terrestre. Il est largement utilisé dans la métallurgie et ses utilisations secondaires dans la chimie sont très variées. Les eaux de surface peuvent contenir jusqu'à quelque mg/l de fer ayant pour origine la lixiviation des terrains traversés ou les pollutions industrielles. Le fer peut se rencontrer jusqu'à 10 mg/l dans les eaux de sondage. Les eaux minérales et principalement les eaux thermo-minérales peuvent en contenir plus de 10 mg/l [28].

### **a.6 Nitrite**

Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque, la nitrification n'étant pas conduite à son terme, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action de nitrifiante. Une eau qui renferme des nitrites est à considérer comme suspecte car lui est souvent associée une détérioration de la qualité microbiologique [28].

### **a.7 Manganèse**

Le manganèse est très répandu dans la nature. Les concentrations dans l'écorce terrestre peuvent varier de 500 à 600 mg/kg. Les minerais les plus connus sont la pyrolusite, la rhodocrosite, la brunite. Certaines eaux souterraines ont des teneurs de l'ordre 1mg/l en particulier lorsqu'il y a supportent milieu réducteur, ou sous l'action de certaines bactéries [28].

### **a.8 Arsenic**

L'arsenic est assez largement réparti dans la biosphère : les roches ignées en contiennent de 1 à 10 mg/kg. Les phosphates naturels 20 mg/kg les charbons 45 mg/kg et les pyrites 5 à 6 g/kg. Il se présente principalement sous forme de sulfure [28].

### **a.9 Zinc**

Le zinc se trouve dans les roches généralement sous forme de sulfure. Le minéral le plus répandu est le sulfure de zinc qui contient également du fer, du calcium, du manganèse et de l'arsenic. Les teneurs en zinc plus importantes dans les eaux à PH faible [28].

### **a.10 Argent**

L'argent est présent dans de nombreuses minérales, le plus souvent sous forme de sulfure, c'est un sous produit de l'extraction du cuivre, du plomb et du zinc [28].

### **a.11 Le cuivre**

Le cuivre se présente dans la nature sous forme de minérale de cuivre natif. De minerais oxydés ou sulfurés, à l'air, il se recouvre d'une mince couche de carbonate basique [28].

### **b. Les anions**

#### **b.1 Sulfates**

Elles sont rencontrées sous forme de sulfates de magnésium et sous forme calcique dans les eaux dures. A fortes concentrations, ils peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux (en particulier chez les enfants). Ils peuvent aussi conférer à l'eau un goût désagréable [29].

#### **b.2 Chlorures**

La source principale de chlorure dans les eaux est due à la dissolution de roches sédimentaires qui se sont déposées en milieu marin et qui n'ont pas été complètement lessivées, et à la présence d'évaporites. L'invasion d'eau de mer, ainsi que les phénomènes d'évaporation dans les bassins endoréiques sont également des sources de chlorures possibles. Le rôle des roches cristallines dans la minéralisation en chlorures est faible. L'apport par les précipitations est d'autant plus important que la distance à la mer est faible. Les apports anthropiques sont mineurs dans les zones d'intervention humanitaire. La teneur en ion chlore des eaux naturelles est essentiellement associée à celle du sodium. Selon les normes marocaines, la concentration en cet élément ne devrait pas dépasser les 300 mg/l [30].

#### **b.3 Sulfures**

Les sulfures sont susceptibles de provenir soit d'eaux usées, soit de pollutions industrielles [28], par dissolution du gaz hydrogène sulfuré dans l'eau. Ce dernier est un élément toxique majeur par inhalation.

### **I.8.2.3 paramètres microbiologiques**

L'eau ne doit contenir ni microbe, ni bactérie pathologique, ni virus qui pourraient entraîner une contamination bactériologique et être la cause d'une épidémie [31].

Les dénombrements bactériens consistent à rechercher des germes aérobies, c'est-à-dire se développant en présence d'oxygène. Cette analyse est surtout significative pour l'étude de la protection des nappes phréatiques. [31].

La présence de coliformes fécaux ou de streptocoques fécaux indique une contamination de l'eau par des matières fécales. La présence d'autres coliformes, de staphylocoques laisse supposer une contamination fécale. Dans les deux cas, des mesures doivent être prises pour interdire la consommation de l'eau ou en assurant le traitement [31].

### **1. Recherche des germes Totaux à 22 C° et 37 C° pathogène**

Certaines maladies infectieuses sont transmises à l'homme par absorption d'eau ou d'aliments pollués par une eau contenant des micro-organismes pathogènes. Les plus redoutables d'entre eux sont les salmonelles, responsables de la fièvre typhoïde et le vibron cholérique responsable du choléra [32].

### **2. Recherche des coliformes Totaux**

Selon l'organisation internationale de standardisation, il s'agit de bacilles gram négatifs (BGN) non sporulés oxydase négative aérobies ou anaérobies facultatifs, capables de fermenter le lactose avec production d'acide et de gaz en 24 à 48 heures à une température comprise entre 36 C° et 37 C° [32].

### **3. Recherche des coliformes Thermo-tolérants**

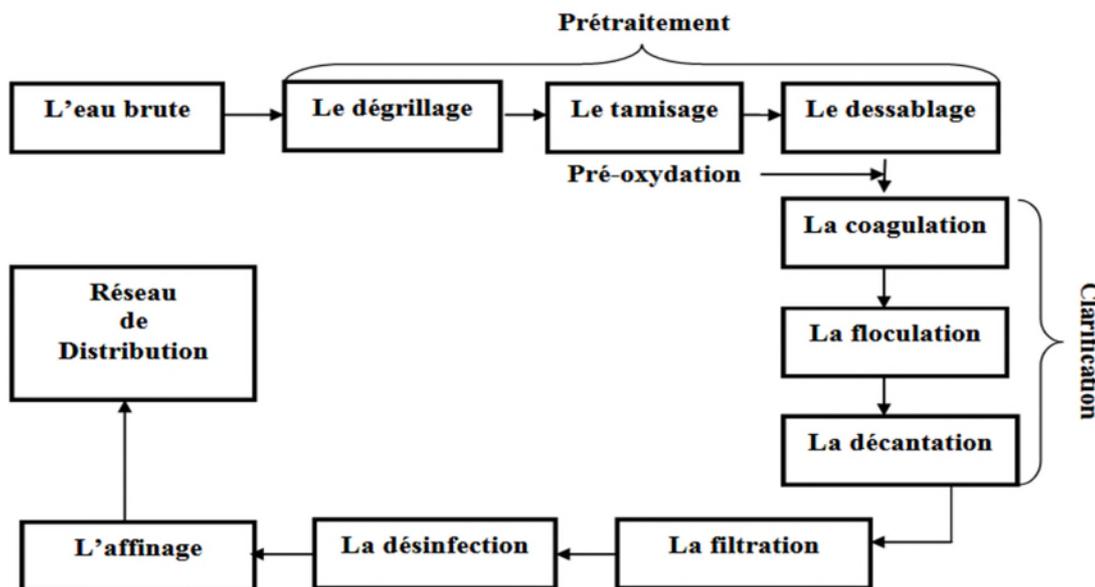
Il s'agit des coliformes possédant les mêmes caractéristiques que les coliformes mais à 44 C°, ils remplacent dans la majorité des cas l'appellation : (coliformes fécaux) on cite à l'exemple de E. coli qui produisent de l'indole à partir du tryptophane, fermentent le lactose ou le mannitol avec production d'acide et de gaz. Elle ne peut pas en général se reproduire dans les milieux aquatiques, leur présence dans l'eau indique une pollution fécale récente [32].

#### 4. Recherche des Streptocoques Fécaux (37 C°)

Il s'agit de cocci à gram positif (CGP) de forme sphérique ou ovoïde, se présentant en Chainettes Pius ou moins longues, non sporulées aéro-anaérobies facultatives, ne possédant ni catalase ni oxydase, ce sont des hôtes normaux d'homme, et ne sont pas considérés comme pathogène [32].

#### I.9.Procédés de traitement des eaux brutes

L'objectif fondamental du traitement de l'eau est de protéger les consommateurs des micro-organismes pathogènes et des impuretés désagréables ou dangereuses pour la santé. Qu'elles soient d'origine souterraines ou superficielles, les eaux utilisées pour l'alimentation humaine sont rarement consommables telles quelles. Il est souvent nécessaire de leur appliquer un traitement plus ou moins approprié [33].



**Figure I 3:** Etapes de traitement des eaux brutes [34].

##### I.9.1. 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. Les prétraitements sont principalement de trois types:

- Le dégrillage.
- Le tamisage.
- Le dessablage.

### **1.Dégrillage**

Le premier poste de traitement, permet de retenir les matières volumineuses (flottants, morceaux de bois, feuilles mortes...etc) et d'empêcher la pénétration des poissons. Cette opération est à effectuer avant la station de pompage afin de protéger d'abord les pompes et ensuite d'alléger les étapes ultérieures de prétraitement [35]

**Tableau I.3** : Les différents types de dégrillage [36].

Type de dégrillage	Espacement des barreaux
Dégrillage fin	< 10 mm
Dégrillage moyen	10 –30 mm
Pré -dégrillage	30 –100 mm

### **2.Tamisage**

Est une opération préconisée sur les eaux peu chargées en matières en suspension avant leur traitement [37].Il permet d'éliminer des objets plus fins que ceux éliminés par le dégrillage. Il s'agit de feuilles ou de morceaux de plastique par exemple [38].

### **3. Le dessablage**

Il consiste à l'élimination des sables présent dans les eaux brutes, est une opération indispensable pour:

- Eviter les dépôts dans les amenées et installations;
- Protéger les pompes et les autres organes mécaniques contre l'abrasion;
- Eviter de perturber les autres stades de traitement [39].

## **4. La clarification**

La clarification est l'ensemble des opérations permettant d'éliminer les matières en suspension (MES) d'une eau brute ainsi que la majeure partie des matières organiques. La clarification comprend les opérations de coagulation, floculation, de décantation et de filtration [39].

### **4.1. La coagulation**

Généralement le processus de coagulation est appliqué directement à l'eau brute. De ce fait, il est avec l'oxydation, l'un des procédés les plus importants dans les filières de traitement des eaux de surface. Fondamentalement, la coagulation implique à l'élimination des particules colloïdales c'est-à-dire les particules en suspension qui, sur la base de leurs dimensions moyennes de 5 à 200 nm. Ce processus résulte de l'addition des réactifs chimiques (appelés coagulants) dans des dispersions aqueuses afin d'assembler en agrégats plus gros, les fines particules dispersées [40].

Les principaux coagulants chimiques utilisés sont à base d'aluminium ou de fer. Les principales formes chimiques utilisables et disponibles de ces métaux sont le sulfate d'aluminium ( $Al_2SO_4$ , appelé également alun), le sulfate de fer ( $FeSO_4$ ) et le chlorure de fer ( $FeCl_3$ ). Ces différents produits sont le plus souvent commercialisés sous forme de cristaux.

Il convient de suivre les instructions du fabricant pour appliquer les dosages adéquats en fonction des volumes d'eau à traiter. Une agitation de l'eau pendant plusieurs minutes accélère l'agrégation des particules solides qui peuvent alors décanter [41].

### **4.2. La floculation**

Lors du processus de floculation, les fines particules dispersées sont combinées en agglomérats plus gros qui peuvent être éliminés par un processus subséquent tel la décantation ou la filtration. La floculation est déterminée par le contact entre particules qui conduit à la croissance en taille et la diminution en nombre des particules en solution [40].

Elle est réalisée par une agitation lente qui permet, grâce à l'injection d'un réactif appelé «floculant» l'agglomération des floccs et donc leur grossissement. Les flocculant généralement utilisés sont la silice activée, les alginates de sodium, les polyélectrolytes...etc [42].

#### **4.3. Décantation**

La décantation est un procédé qu'on utilise pratiquement dans toutes les usines d'épuration et de traitement des eaux, a pour but d'éliminer les particules en suspension dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Ces particules sont en générale des particules de flocc ou des particules résultant de la précipitation qui a lieu lors des traitements d'adoucissement ou d'élimination du fer et du manganèse [12]. Les matières organiques ou minérales grenues et les matières flocculeuses chutent au fond du bassin de décantation et constituent des boues qui sont extraites périodiquement. L'eau clarifiée, située près de la surface, est dirigée vers l'unité de filtration [37].

#### **4.4. Filtration**

La filtration est un procédé de séparation solide/ liquide qui utilise le passage à travers un milieu poreux (la plus courante est le sable) qui retient les particules en suspension dans l'eau brute ou l'eau prétraitée (flocculée et décantée) mesure que les particules solides atteignent la couche filtrante, elles se déposent et absorbent les matières minérales ou organiques qui arrivent ultérieurement [9]. Ceci peut conduire à la formation d'un film biologique. Avec le temps, il y a diminution du diamètre des pores du filtre, on dit qu'il y a colmatage.

D'une façon générale, on distingue deux types de filtration:

La filtration lente qui a l'avantage d'être une opération facile mais présentant plusieurs inconvénients tels que la nécessité d'une grande surface et l'exigence d'une eau dont la turbidité est faible.

La filtration rapide, qui en revanche est une opération relativement complexe mais palliant aux inconvénients de la première [12] [9].

## **5.Désinfection**

La désinfection est sans aucun doute l'étape la plus importante du traitement de l'eau destinée à la consommation [43].

Elle est un traitement qui permet de détruire ou d'éliminer les microorganismes susceptible de transmettre des maladies hydriques. Ce traitement n'inclut pas nécessairement la stérilisation, qui est la destruction totale des organismes vivants dans un milieu donnée. On peut procéder à la désinfection en ajoutant à l'eau une certaine quantité d'un produit chimique doté de propriétés germicides. Les produits chimiques les plus utilisés sont: le chlore, le dioxyde de chlore, l'ozone, le brome, l'iode et le permanganate de potassium. On peut également désinfecter l'eau grâce à des moyens physiques: ébullition, ultrasons, ultraviolets ou rayons gamma [37].

### **I.10.Traitement par échange d'ion et adoucisseur**

L'adoucissement de l'eau consiste à échanger les ions calcium et magnésium, peu solubles et qui réagiraient avec les carbonates de l'eau pour former du calcaire, contre les ions sodium qui sont parfaitement solubles dans l'eau. On nomme cette opération «échange ionique».

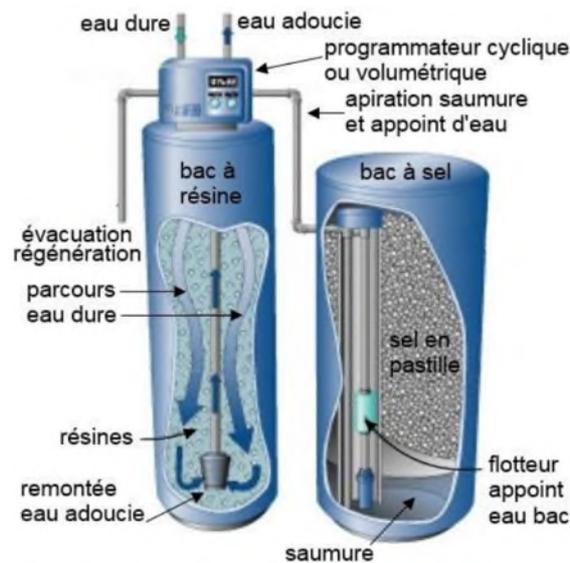
L'échange ionique de l'adoucissement est réalisé par le passage de l'eau sur un support solide : la résine. Il s'agit d'une résine cationique forte porteuse d'ions sodium. Elle se présente sous forme de billes poreuses de 0,2 à 3 mm de diamètre et de densité réelle légèrement supérieure à celle de l'eau. Celle-ci a beaucoup plus d'affinité pour les ions calcium et magnésium que pour les ions sodium dont elle est chargée à l'origine.

Lorsque cette résine est mise en contact avec de l'eau dure contenant des ions calcium et magnésium ces derniers se fixent sur la résine en prenant la place des ions sodium qui y étaient à l'origine. Ces ions sodium sont libérés dans l'eau en lieu et place des ions calcium et magnésium. L'eau qui a ainsi percolé de haut en bas sur un lit de résine va céder tous les ions calcium et magnésium qu'elle contenait. Sa dureté tend donc vers zéro.

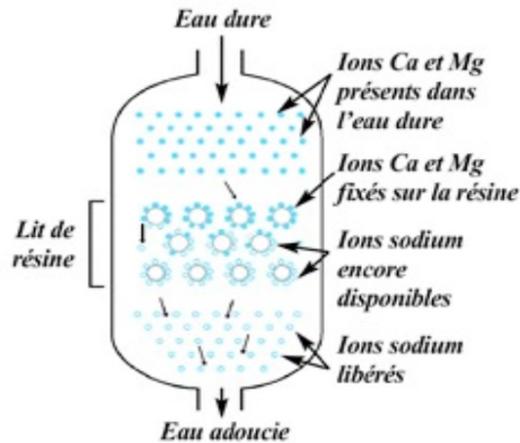
Lorsque la résine a cédé tous les ions sodium dont elle était chargée, l'échange d'ions ne peut plus se faire. La résine est dite «saturée», les ions calcium et magnésium ne peuvent plus y être fixés, et l'eau qui sort du lit de résine est aussi dure que celle qui y rentre.

Il est possible de chasser les ions calcium de la résine et de les remplacer par des ions sodium, c'est à dire de redonner à la résine sa forme d'origine. Cette opération est appelée «régénération». Pour « régénérer » la résine saturée, il suffit de la mettre en contact avec une solution très riche en ions sodium.

Dans la pratique, on utilise une solution concentrée de chlorure de sodium, appelée «Saumure», obtenue par dissolution dans de l'eau de sel raffiné commercialisé sous forme de pastilles ou de granulés. Comme la résine a plus d'affinité pour le calcium et le magnésium que pour le sodium, on est obligé, pour régénérer la résine, d'utiliser un excès de sodium [44].



**Figure I.4 :** Le fonctionnement d'un adoucisseur



**Figure I.5** : le principe de l'adoucissement de l'eau

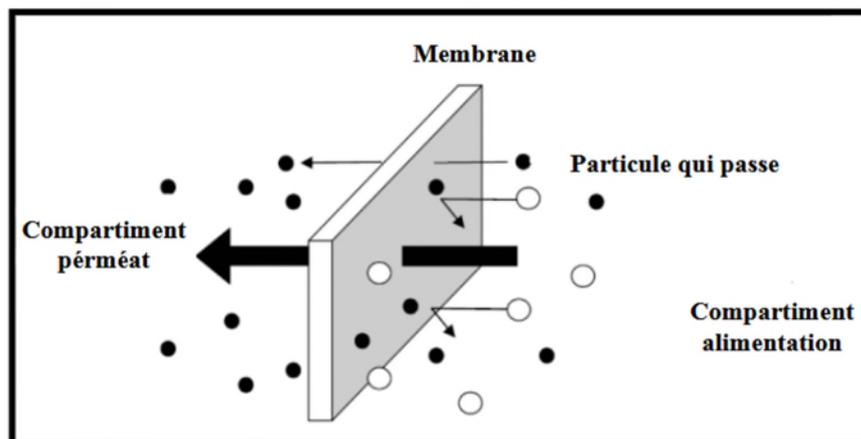
## I.11. Traitement par la technologie des membranes

### 1 principe

Une membrane peut être définie comme étant une couche mince de matière, permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert.

Selon [45] les critères de séparation des particules, des molécules et/ou des ions peuvent être

- ❖ La dimension et la forme;
- ❖ La nature chimique;
- ❖ L'état physique;
- ❖ La charge électrique, etc.



**Figure I.6**: Schéma de membrane sélective [6].

## 2. Les techniques membranaires à gradient de pression

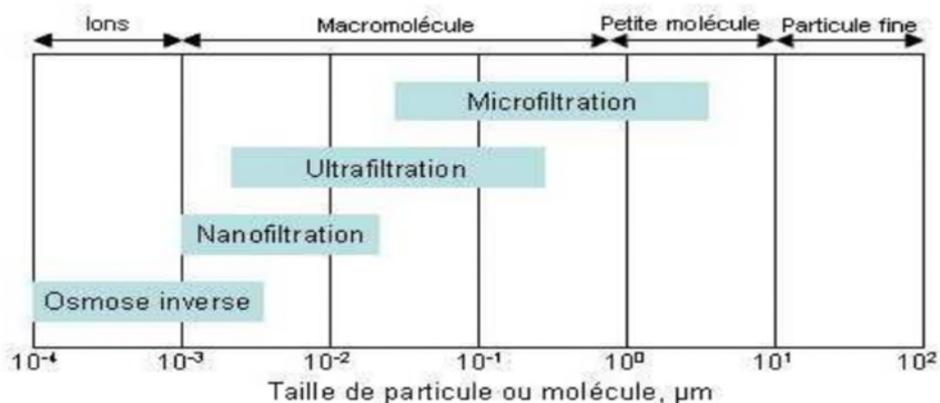
La force motrice est la pression générée par une pompe et qui sert à vaincre les différentes résistances de la membrane.

Elles reposent sur une différence de pression totale de part et d'autre de la membrane. Parmi ces procédés, on distingue :

- ❖ La microfiltration (MF),
- ❖ L'ultrafiltration (UF),
- ❖ La nanofiltration (NF),
- ❖ L'osmose inverse (OI).

Ces techniques sont classées selon la taille moyenne des pores des membranes [46].

La figure suivante, I.7, présente les intervalles de porosité de chaque type de membrane ainsi que des applications modèles illustrant ces seuils de coupure.



**Figure I.7** : Classification des procédés barométriques membranaires selon la taille de Séparation [47].

### 2.1. Microfiltration tangentielle

Ce procédé de séparation solide-liquide met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0,1 et 10 µm. Il permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des plus grosses particules obtenues par complexation, précipitation ou floculation.

Théoriquement, la différence entre ultrafiltration et microfiltration est très nette.

- l'ultrafiltration fonctionne en phase liquide homogène alors que la microfiltration a pour objectif une séparation solide-liquide
- la pression de travail est généralement plus faible dans le cas de la microfiltration (Pression transmembranaire < 3 bars) ;

les flux de filtration sont souvent plus importants dans le cas de la microfiltration [48].

## **2.2. L'ultrafiltration**

Les membranes d'UF sont des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, colloïdes). Cette technique est souvent utilisée pour la concentration de solutions macromoléculaires (protéines, polysaccharides, Polymères variés) et aussi l'élimination de macro solutés présents dans les effluents ou dans l'eau à usage domestique, industriel (électronique) ou médical [4, 14]. Pour la production d'eau potable, elle est généralement préférée à la microfiltration; elle donne certes un débit plus faible, utilise des pressions plus élevées, mais se colmate beaucoup moins sur le long terme. Outre la qualité de l'eau produite l'UF a la capacité d'arrêter les virus [6].

## **2.3. La nanofiltration**

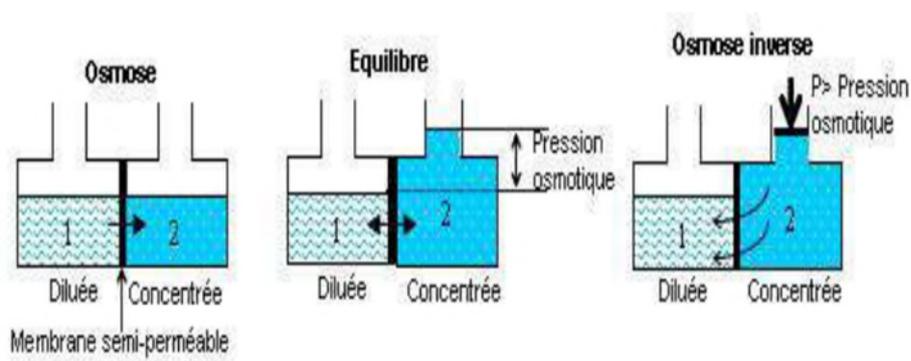
La nanofiltration est un procédé membranaire qui couvre un domaine de séparation intermédiaire entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse. Les membranes de nanofiltration permettent la séparation de composés de taille voisine du nanomètre. Elle retient fortement les sels ionisés bivalents tels que le calcium et le magnésium et surtout les sulfates ainsi que des composés organiques non ionisés [49]. Cette technique est souvent utilisée pour l'adoucissement ainsi que pour la purification des eaux vis-à-vis de leurs polluants organiques tels que les pesticides. La modification de sa surface reste l'une de ses principales avancées technologiques, déjà appliquée à Mery sur Oise et maintenant largement utilisée; cela permet de favoriser un peu plus le passage de Ca et Mg, cations vitaux, au détriment des sulfates. Cette technologie a été proposée comme option de traitement pour les barrages algériens, souvent contaminés par les métaux lourds et la matière organique anthropique [6].

## 2.4.L'osmose inverse

Ce procédé permet de filtrer des solutions contenant des espèces de très faible masse molaire et ne laisse passer que le solvant et qui arrête tous les sels. Il utilise des membranes denses. La séparation solvant – soluté se fait par un mécanisme de solubilisation-diffusion, La pression appliquée doit être supérieure à la pression osmotique exercée en amont de la membrane par la solution filtrée pour observer un flux de perméat à travers la membrane. Les pressions appliquées varient de 20 à 80 bars [50].

### 2.4.1. Principe de l'osmose inverse

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Considérons un système de deux compartiments séparés par une membrane semi perméable sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure ). Le solvant (généralement l'eau) s'écoule à travers la membrane du compartiment de la solution moins concentrée vers le compartiment contenant la solution la plus concentrée, c'est le phénomène d'osmose. Si on applique progressivement une pression sur le compartiment de la solution la plus concentrée, le flux d'eau qui traverse la membrane va diminuer, puis s'annuler quand la pression appliquée atteindra à la pression osmotique. Si on applique une pression supérieure à la pression osmotique, l'eau va traverser la membrane dans le sens inverse du flux osmotique, c'est le phénomène d'osmose inverse [51].



**Figure I.8 :** Principe de l'osmose et de l'osmose inverse [51].

**2.4.2. Pression osmotique**

La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van't Hoff qui stipule que la pression osmotique exercée par un soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercé dans l'état gazeux parfait dans le même volume (V) et à la même température (T). Si le soluté est dissocié en n ions, la pression osmotique sera n fois supérieure [51].

La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en solutés :

$$\Pi = n.C.R.T$$

Avec :  $\Pi$  : Pression osmotique (bar)

n : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

C : Concentration molaire (mol.l<sup>-1</sup>)

R : Constante des gaz parfaits (0,082 l.bar.mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

T : Température absolue (Kelvin).

Le tableau I.4 regroupe les caractéristiques des différents procédés de séparation membranaire.

**Tableau I.4** : Caractéristiques des différents procédés de séparation membranaire [52].

	Procédé			
	Microfiltration	Ultrafiltration	Nanofiltration	Osmose inverse
Caractéristiques de la membrane	Poreuse Convection 100 à 10000 nm	Poreuse Convection 1 à 100 nm	Poreuse Solubilisation/diffusion + Convection 1 à 10 nm	Dense Solubilisation/diffusion
Perméation de	Solvants et espèces Dissoutes	Solvants, sels et petites molécules	Solvants, ions monovalents et petites molécules	Solvants
Rétention de	Particules, colloïdes	Macromolécules colloïdes,	Petites molécules (M > 300 g/mol) Ions	Sels
Applications	Épuration bactérienne du lait Fractionnement des globules gras du lait Fractionnement de protéines Traitement d'émulsions huile/eau	Concentration de protéines Clarification et stabilisation de moûts, jus, Fabrication de préfromage liquide Traitement des effluents (saumure)	Séparation et concentration d'antibiotiques Fractionnement d'acides aminés Adoucissement d'eau potable Concentration et déminéralisation du lactosérum	Concentration de lactosérum, de sang, de blanc d'œuf, de sève d'érable Dessalement des eaux

### II.1 Présentation des plans d'expériences

Les plans d'expériences prennent une place très importante de nos jours particulièrement dans les études industrielles en recherche-développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels comme les industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques.....etc.

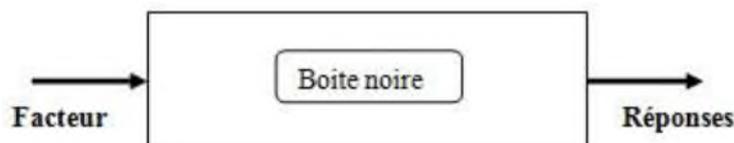
C'est Fisher, qui, pour la première fois en 1925, proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois. Cette méthode fut reprise puis développée par des statisticiens et des mathématiciens. La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum. [53][55].

L'utilisation des plans d'expériences dans des systèmes simples ou complexes ayant des fonctions d'étude de types ; qui définissent des tables d'expériences permettant de réduire considérablement le nombre d'expériences :

$$Y = f(x_i) \quad (II.1)$$

Avec :

- $Y$  : Réponse du système ;
- $x_i$  : Facteurs ou variables d'entrées du système, ils peuvent être continus ou discrètes, Qualitatives ou quantitatives. Ils permettent d'éclaircir et de comprendre le fonctionnement de ces derniers en les simulant à une « boîte noire ».



**Figure II.1:** Schéma du principe des plans.

Le principe de la boîte noire consiste à imposer aux facteurs d'entrées des variations

## Chapitre II | Plan d'expérience

---

Particulièrement, à mesurer les variations induites des réponses et à en déduire les relations entre facteurs et réponse sans avoir une connaissance maximale du phénomène étudié [53] [57].

### II.2 Principe

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont des variables discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre d'une part, de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés et d'autre part, à détecter les interactions entre les facteurs et la détermination du réglage dit optimal de ces facteurs par rapport à une réponse. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats. Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. On peut cependant, diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories [58] [59] :

- Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres ;
- Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

Afin d'obtenir des informations pertinentes, une démarche méthodologique doit être suivie :

- définition des objectifs et critères;
- définition des facteurs à étudier et du domaine expérimental;
- construction du plan d'expériences;
- expérimentation;
- analyse des résultats;
- conduite éventuelle d'essais supplémentaires;
- validation des résultats;
- conclusion de l'étude.

A l'issue de cette procédure, on pourra conclure sur les résultats obtenus par les plans [58] [59].

### II.3 Formules de codage

L'établissement du modèle exprimant la réponse en fonction des paramètres opératoires, nécessite la transformation de ces derniers en variables codées ou variables centrées réduites.

## Chapitre II | Plan d'expérience

La formule permettant le passage des variables réelles aux variables codées est [60].

$$X_j = \frac{z_j - z_j^0}{\Delta z_j}; j=1,2,\dots,k.$$

$$\text{Où : } z_j^0 = \frac{z_{j\max} + z_{j\min}}{2} \quad \text{et} \quad \Delta z_j = \frac{z_{j\max} - z_{j\min}}{2\alpha} \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

$x_1, x_2, \dots, x_k$  : Variables centrées réduites ou variables codées ;

$Z_1, Z_2, \dots, Z_k$  : Facteurs contrôlés (variables réelles) ;

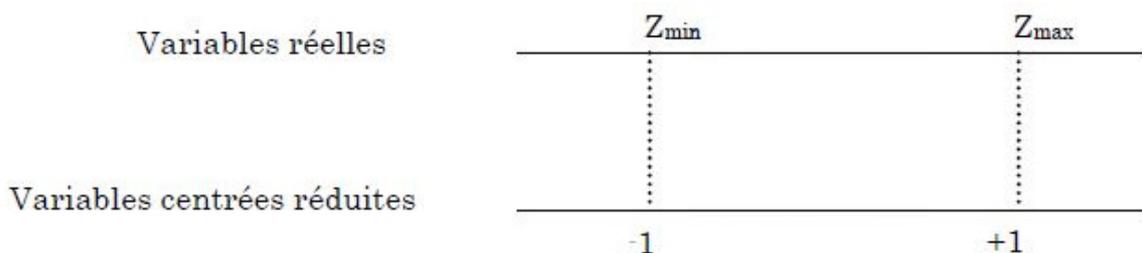
$z_1^0, z_2^0, \dots, z_k^0$  : Variables réelles correspondantes au centre du plan ou parfois niveau fondamental ;

$\Delta z_j$  : Unité ou intervalle de variation suivant l'axe des  $Z_j$  ;

$z_{\min}$  : Valeur minimale de la variable réelle ;

$z_{\max}$  : Valeur maximale de la variable réelle.

Il importe de bien préciser ce que nous entendons par « variables centrées réduites » car nous donnons ici, à cette expression, un sens différent de celui qui est habituellement retenu en statistique, où une « variable centrée réduite » est une variable de moyenne nulle et de variance unité. La théorie des plans d'expériences utilise une définition différente pour les « variables centrées réduites ». Pour éviter toute confusion, précisons en le sens : Soit  $Z$  une variable qui au cours de l'expérimentation prend les valeurs extrêmes  $Z_{\min}$  et  $Z_{\max}$ , on fera correspondre à ces deux valeurs d'origine les variables centrées réduites  $-1$  et  $+1$  respectivement (**figure II.10**) [62].



**Figure II.2** : Variables centrées réduites [55].

### II.4 Modélisation par les plans d'expériences

La modélisation est l'objet même des plans d'expériences. Elle permet une fois que les

## Chapitre II | Plan d'expérience

facteurs influents sont identifiés, de trouver l'équation ou la fonction qui décrit au mieux les variations du phénomène étudié en fonction de ces facteurs [62] [63].

Toute réponse expérimentale peut être écrite sous la forme suivante :

$$y = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_k) + \varepsilon \quad (\text{II.3})$$

- y : réponse expérimentale ;
- z1, z2, .....zk : Facteurs contrôlés ;
- ε : Erreurs expérimental.

Où f est une fonction inconnue (modèle théorique) des facteurs influents contrôlés (Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, ..., Z<sub>k</sub>).

Cette fonction, inaccessible par l'expérience, ne peut être qu'estimée par lissage à l'aide de polynômes. L'idée de base présidant à ce choix étant qu'au voisinage d'un point, toute fonction peut être développée en série de Taylor et donc remplacée par un polynôme.

L'équation de régression obtenue sur la base de l'expérience, s'écrit sous la forme suivante [62] [63].

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k b_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 \quad (\text{II-4})$$

Où x<sub>j</sub> sont les coordonnées des facteurs Z<sub>j</sub> exprimées en variables centrées réduites, (j=1,2,..k).  $\hat{y}$  est l'estimée (valeur prédite par le modèle) de y (valeur expérimentale). Chaque valeur expérimentale y<sub>i</sub> est sujette aux erreurs aléatoires ε<sub>i</sub> à distribution normale telle que [64] :

$$y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i \quad (\text{II-5})$$

Avec :

b<sub>0</sub> : terme constant de l'équation de régression ;

b<sub>j</sub> : effets linéaires ;

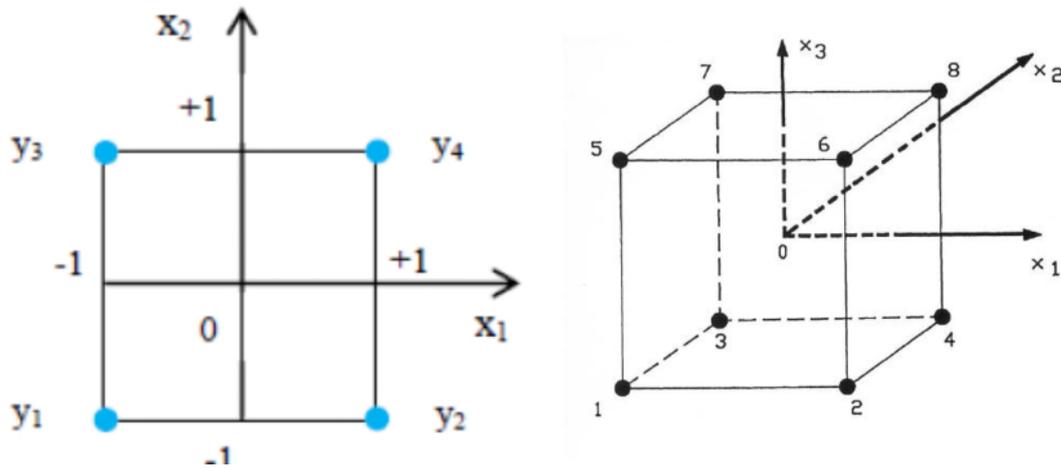
b<sub>u j</sub> : effets d'interactions ;

b<sub>j j</sub> : effets quadratiques.

### II.4.1.Plans factoriels complets à deux niveaux ( $2^k$ )

Ce sont les plus utilisés car les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. 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 [65].

Le principe consiste alors à répartir, de façon optimale, les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple deux plans factoriels complets à 2 et 3 facteurs notés  $2^2$  et  $2^3$  respectivement. Les points expérimentaux seront situés aux sommets du domaine d'étude (Figure II.11).



**Figure II.3:** Disposition des points expérimentaux d'un plan  $2^2$ (a) et  $2^3$ (b) [67].

## Chapitre II | Plan d'expérience

**Tableau II.1:** Matrice de planification des expériences d'un plan  $2^3$  [68].

N° de l'essai	Valeurs des facteurs à l'échelle naturelle			Valeur fictive	Valeurs centrées réduites des facteurs				Réponses
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$		$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	$Z_{1min}$	$Z_{2min}$	$Z_{3min}$	1	-1	-1	-1	$y_1$	
2	$Z_{1min}$	$Z_{2min}$	$Z_{3max}$	1	-1	-1	1	$y_2$	
3	$Z_{1min}$	$Z_{2max}$	$Z_{3min}$	1	-1	1	-1	$y_3$	
4	$Z_{1min}$	$Z_{2max}$	$Z_{3max}$	1	-1	1	1	$y_4$	
5	$Z_{1max}$	$Z_{2min}$	$Z_{3min}$	1	1	-1	-1	$y_5$	
6	$Z_{1max}$	$Z_{2min}$	$Z_{3max}$	1	1	-1	1	$y_6$	
7	$Z_{1max}$	$Z_{2max}$	$Z_{3min}$	1	1	1	-1	$y_7$	
8	$Z_{1max}$	$Z_{2max}$	$Z_{3max}$	1	1	1	1	$y_8$	

### II.4.1.1 Calcul des coefficients du modèle

Le calcul simple des coefficients du modèle provient des propriétés algébriques de la matrice  $[X]$  des effets des plans factoriels.

Dans le cas des plans factoriels à deux niveaux, les coefficients du modèle de premier degré peuvent être fournis par un programme de régression multilinéaire utilisant le critère des moindres carrés. le vecteur solution  $B$  se calcule facilement comme suit :

$$B = [X^T X]^{-1} \cdot [X^T] \cdot Y \quad (\text{II- 6})$$

$[X^T X]^{-1}$  est la matrice inverse de la matrice  $[X^T X]$

$[X]$  est la matrice des variables indépendantes,  $[X^T]$  est la matrice transposée et  $Y$  est le vecteur des observations [53] [57] [67].

### II.4.1.2 Analyse statistique

#### 1. Vérification de la signification des coefficients

##### a. Cas où chaque essai est répété m fois

On détermine la moyenne des résultats des essais parallèles [53] [57] [64].

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

Puis les variances de sondage :

$$S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2}{m-1} \quad i=1,2,\dots,N \quad (\text{II-8})$$

Avec :

- m : Nombre de répétitions pour chaque essai ;
- N : Nombre d'expériences.

Si les variances de sondage sont homogènes, on calcule alors la variance de reproductibilité :

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} \quad i=1,2,\dots,N \quad (\text{II-9})$$

### **b. Cas où l'essai au centre est répété $n_0$ fois**

Dans ce cas, la variance des mesures (ou de reproductibilité) est estimée par celle calculée au centre du domaine expérimental :

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_i - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1} \quad i=1,2,\dots,n_0 \quad (\text{II-10})$$

Avec  $f = (n_0 - 1)$  degrés de liberté

$\bar{y}_0$  la moyenne sur les mesures au centre :

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} y_i}{n_0} \quad i=1,2,\dots,n_0 \quad (\text{II. 11})$$

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

$$H_0 = (b_j = 0)$$

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

Pour ce faire, on calcule le rapport :

$$t_j = \frac{b_j / sb_j}{sb_j} \quad (\text{II} - 12)$$

$t_j$  : Suit une loi normale ;

$b_j$  :  $J^{\text{ième}}$  coefficient de l'équation de régression ;

$sb_j$  : Ecart quadratique moyen qui est défini dans le cas d'un modèle du premier degré par :

$$sb_j = \frac{s_{rep}}{\sqrt{N}} \quad (\text{II} - 13)$$

On utilise la table de Student pour déterminer la valeur de  $t_\alpha (f)$  pour le niveau de signification choisi  $\alpha$  et le nombre de degrés de liberté  $f$ . En utilisant la partie de la table relative à un test bilatéral, la règle du test est alors la suivante :

- Si  $t_j > t_\alpha (f)$ , on rejette  $H_0$  au risque accepté.
- Si  $t_j < t_\alpha (f)$ , on accepte  $H_0$  au risque accepté.

Si l'hypothèse  $H_0$  est acceptée, cela veut dire que le coefficient en question n'est pas significativement différent de zéro au risque  $\alpha$  et donc que la variable qui lui est associée n'a pas d'influence sur la réponse.

### **2. Validation du modèle**

Avant d'accepter le modèle postulé, nous devons vérifier l'absence de biais : le modèle doit décrire correctement les variations de la réponse en fonction des facteurs [64] [65] [69].

#### **a. Recherche de biais du modèle**

Le test de Fisher Snedecord consiste à comparer la variance résiduelle à la variance de reproductibilité :

$$s_{rés}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \widehat{y}_i)^2}{N-l} \quad (\text{II} - 14)$$

à (N-1) degrés de liberté (1 étant le nombre de coefficients significatifs)  $s_{rep}^2$ .

Si  $F = \frac{s_{rés}^2}{s_{rep}^2} < F_{0.95}(N-1, n_0-1)$ , alors la variance résiduelle peut être considérée comme non significativement différente de la variance aléatoire au centre du domaine et nous concluons à l'absence de biais, ce qui revient à dire que la part des variations de y non expliquée par le modèle est aléatoire.

### **b. Test de signification de la régression**

Lorsque le modèle est sans biais nous pouvons effectuer le test de signification de la régression. La part des variations de y expliquée par la régression est-elle significativement plus grande que la part due aux variations aléatoires ? Pour répondre à cette question, il suffit de calculer le rapport suivant :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N (\widehat{y}_i - \bar{y})^2 / (l-1)}{\sum_{i=1}^N (y_i - \widehat{y}_i)^2 / (N-l)} \quad (\text{II} - 15)$$

Avec :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (\text{II} - 16)$$

Si F est supérieur à la valeur tabulée du test Fisher  $F_{\alpha, f_1, f_2}$  pour le niveau de signification  $\alpha$  et les nombre de degrés de liberté  $f_1=(l-1)$  et  $f_2=(N-l)$ , dans ce cas, les variables retenues pour la modélisation ont dans leur ensemble, un effet significatif sur y et l'équation est adéquate.

### **II.1.2.3 Coefficient de détermination**

Appelé aussi coefficient de corrélation, il est défini par [65] [66] :

$$R^2 = \frac{\text{variation due à la régression}}{\text{variation totale}}$$

Soit :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{II} - 17)$$

Lorsque l'échantillon est l'étendue assez faible, il est nécessaire d'apporter une correction pour l'erreur systématique. L'estimation de la force de la liaison par le coefficient de corrélation multiple est d'autant plus exagérée que le nombre de degrés de liberté de l'échantillon  $f = N - l$  est plus petit [63] [61]. La formule de correction est :

$$\bar{R}^2 = R^2 - (1 - R^2) \frac{l-1}{N-l} \quad (\text{II} - 18)$$

Où  $\bar{R}^2$  est la valeur corrigée du coefficient de régression multiple. Plus le coefficient de détermination est proche de 1, plus le modèle est représentatif c'est-à-dire, meilleur.

### II.1.2.4 Analyse des résidus

Un résidu est la différence entre la réponse mesurée et la réponse calculée. L'analyse des résidus consiste à porter ces derniers en fonction des réponses prédites ou en fonction d'autres grandeurs. On peut ainsi détecter s'il existe une relation entre les résidus et la grandeur portée en abscisse. On doit arriver à des diagrammes ne laissant apparaître aucune relation ou tendance entre les grandeurs étudiées [69].

### II.4.2 Plans d'expériences pour surfaces de réponses

Le plan que nous avons présenté précédemment permet d'étudier et de comparer les effets des facteurs sur une réponse. L'objectif est donc d'obtenir un réglage dit optimal de ces paramètres dans le domaine de variation de ceux-ci par rapport au critère sélectionné. Parmi les nombreux types de plans permettant de construire des surfaces de réponses, nous ne présenterons et n'utiliserons ici que le plan composite centré. Notre choix s'est porté sur ce plan car il présente l'avantage de la facilité de construction d'une part, et d'autre part, il est construit en ajoutant quelques expériences à celles utilisées pour la construction du plan factoriel complet [54].

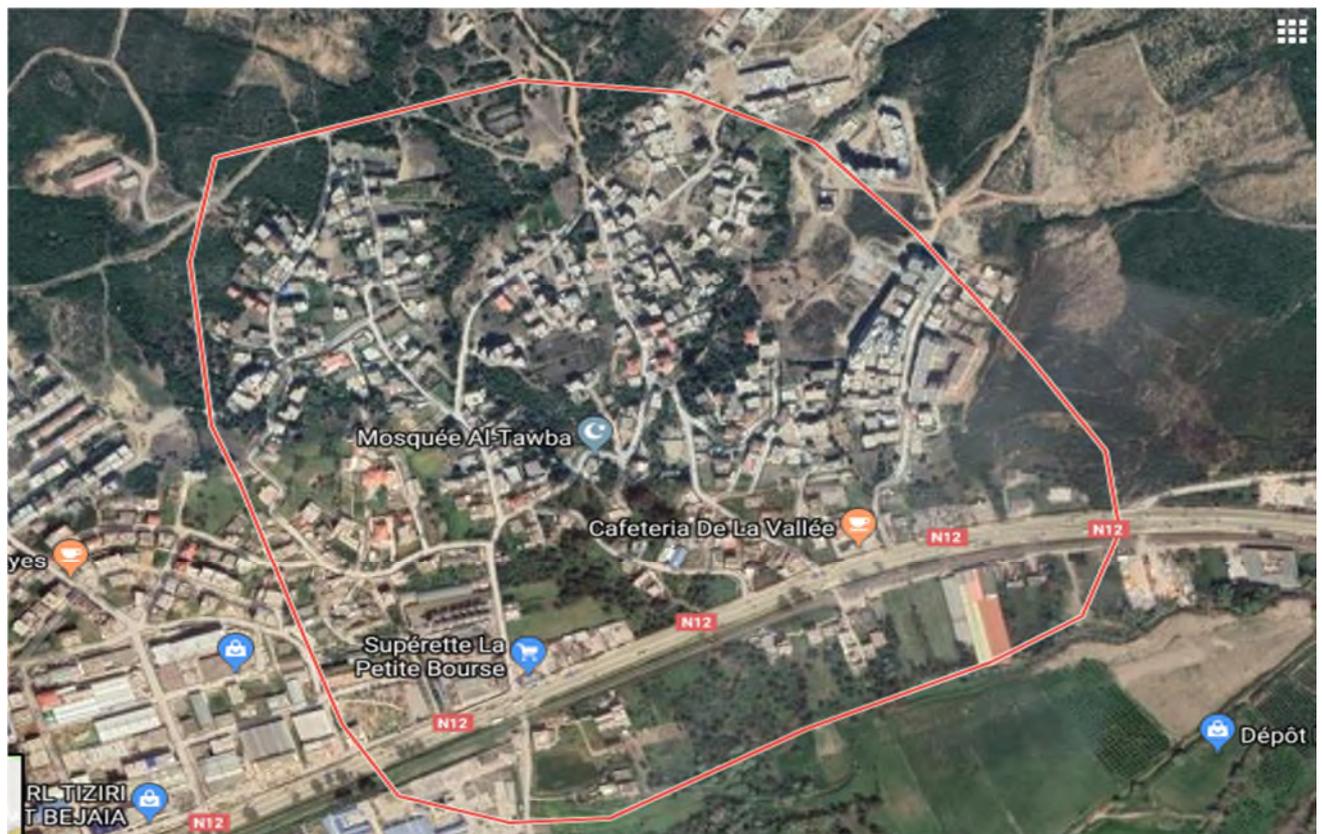
### **III.1.Sources d'eau utilisée pour la production de l'eau ultra pure à CEVITAL**

Au niveau du CEVITAL, l'eau brute utilisée est une eau obtenue à partir de deux sources:

- La première source située au niveau d'IBOURASSEN (Bejaïa) sous forme d'un puits de forage artésien.
- La deuxième source située au niveau de TICHY-HAF barrage d'eau.

#### **III.1.1.Présentation du puits de forage d'IBOURASSEN**

Le puits de forage artésien situé à IBOURASSEN (Oued Ghir) environ 12km du complexe Cevital - Bejaia, composé de trois puits ouverts dont l'eau est captée d'une nappe phréatique, chaque puits possède une pompe à environ 65m de profondeur, ceci envoie environ (9000-10000) m<sup>3</sup>/ jours.



**Figure III.1 :** Situation géographique du puits de forage d'IBOURASSEN

### III.2. Prélèvement des échantillons d'eau

Le prélèvement d'un échantillon est une opération délicate, à la quelle le plus grand soin doit être apporté. Pour ce faire, il doit satisfaire aux conditions ci-dessous:

- Les échantillons doivent être homogènes et représentatifs;
- Les échantillons doivent être recueillis, conservés et expédiés dans des flacons stérilisés adéquats s'il s'agit d'analyse bactériologique;
- Le volume recueilli doit être suffisant pour permettre une analyse précise;
- Tous les renseignements utiles sur les échantillons doivent être indiqués et le flacon doit être étiqueté correctement pour éviter les erreurs [70].

La technique de l'échantillonnage est primordiale car il conditionne la pertinence et la fiabilité des résultats de l'analyse. Il doit être précis mais également le mieux planifié dans le temps et dans l'espace, pour qu'il soit le plus représentatif de l'échantillon d'eau à étudier.

Dans notre cas, l'échantillonnage a été fait :

- ✓ le **21/04/2019** à partir de **10h20** au niveau de l'entrée de l'eau brute qui alimente la station de traitement de CEVITAL-Bejaia.

Dans le cadre de notre étude, nous avons effectué au total un échantillon d'eau dont un seul prélèvement pour l'analyse physico-chimique et un seul prélèvement pour l'analyse bactériologique. Ces prélèvements ont été réalisés au niveau de l'entrée de l'eau brute qui alimente la station de traitement de CEVITAL.

Les échantillons d'eau nécessaires à l'analyse physico-chimique ont été prélevés selon la méthode décrite par Rodier et al. (2009) [70], dans des flacons jetables en matière plastique et conservés à 4°C, ensuite analysés dans les 24 heures qui suivent.

Pour le prélèvement d'eau nécessaire à l'analyse bactériologique, nous avons utilisé des flacons en verre de 250 ml munis d'un cordon. Le prélèvement bactériologie se déroule comme suit :

Ouvrir le robinet et laisser l'eau couler pendant quelque minute, fermer et stériliser le robinet avec un coton imbibé d'alcool. Nous avons d'abord passer un fragment de coton imbibé d'éthanol, puis flamber l'orifice du robinet à l'aide d'un briquet, puis en laissant l'eau couler pendant un instant suivie d'une prise d'échantillon d'eau ( flambage du goulot du flacon avant et après remplissage).Le flacon ne doit pas être rempli complètement, afin de fournir de

l'oxygène aux microorganismes aérobies (la teneur des échantillons en certains microorganismes peut se modifier rapidement, pour cela les analyses doivent être immédiates, ne pas dépasser les 24h après le prélèvement).

Ensuite, nous avons collé des étiquettes portant les mêmes informations que celles des échantillons pour les analyses physico-chimiques qui seront faites au laboratoire de l'université.

Les prélèvements sont placés dans une glacière à 4°C pour empêcher la multiplication de germes, puis acheminés aux laboratoires.

### **III.3.Méthodes d'analyses**

Les analyses physico-chimiques ont concerné la température, le pH, la conductivité électrique (CE), la turbidité, l'oxygène dissous, les matières en suspension (MES), la dureté totale, le calcium, le magnésium, les chlorures et les nitrates. L'analyse bactériologique a pour but de mettre en évidence la présence des germes, basés sur la recherche et la numération de celles-ci dans les échantillons à analyser. Les germes recherchés sont: les Germes totaux, les Coliformes totaux et l'identification d'*Escherichia coli*, la recherche et le dénombrement des Streptocoques fécaux,

#### **III.3.1.Analyses physico-chimiques**

##### **III.3.1.1.Mesure de la température**

La température de l'eau, joue un rôle non négligeable dans l'intensité de la sensation de l'eau. Elle est le facteur le plus apprécié pour une eau destinée à la consommation humaine [71].

La mesure de la température a été effectuée en plongeant immédiatement le thermomètre dans le flacon d'eau à analyser pendant 5 minutes. La lecture doit se faire à travers les parois du flacon. Généralement, Les appareils de mesure de la conductivité ou du pH possèdent un thermomètre intégré [70].

##### **III.3.1.2.Mesure du potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH est l'une des mesures que l'on doit effectuer le plus fréquemment, il est relié à la teneur en ions H<sup>+</sup> et aussi à l'acidité et l'alcalinité de l'échantillon. Le pH-mètre est l'appareil le plus utilisé pour la mesure du pH.

### ❖ Réactifs utilisés :

Solutions tampons pH= 4 ; 7 ; 10;

Eau brute ;

L'eau distillée.

### ❖ Matériels :

Appareil pH-mètre de marque Hanna munit d'une cellule de verre avec deux électrodes combinées d'Ag /AgCl;

Papier absorbant ;

Pissette ;

Bêcher.

### ❖ Mode opératoire

-Brancher le pH-mètre, le laisser se stabiliser pendant quelques minutes, installer les électrodes aux entrées correspondantes sur l'appareil, et:

-Etalonner l'appareil à l'aide d'une solution tampon. Ensuite rincer l'électrode avec de l'eau distillée et avec l'échantillon à analyser,

-Amener l'échantillon d'eau à analyser à la température désirée,-Plonger l'électrode dans l'échantillon à analyser et lire la valeur de pH directement,

-Après chaque détermination du pH, on retire l'électrode, on la rince et à la fin de l'expérience, on la laisse tremper dans l'eau distillée [70].

#### **III.3.1.3. Mesure de la conductivité électrique (CE)**

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique. L'unité de conductivité est le siemens par mètre (S/m) (1 S/m = 10<sup>4</sup>μS/cm = 10<sup>3</sup>mS/m). La relation entre la résistivité et la conductivité est la suivante:

$$\text{Résistivité } (\Omega \cdot \text{cm}) = \frac{1000000}{\text{conductivité } (\text{S/cm})}$$

Pour la détermination de la conductivité, nous avons utilisé un conductimètre multiéléments.

**Tableau III-1** : La minéralisation des eaux en fonction de la conductivité électrique.

La conductivité ( $\mu\text{s/cm}$ )	La minéralisation de l'eau
Conductivité < 100	Très faible
100 < conductivité < 200	Faible
100 < conductivité < 333	Moyenne
333 < conductivité < 666	Moyenne accentuée
666 < conductivité < 1000	Importante
conductivité > 1000	Elevée

### ❖ Matériels

Appareil conductimètre de marque Inolab 700 munit d'une cellule conductimétrique avec deux électrodes de carbone vitreux de constante de cellule  $k = 0,475 \text{ cm}^{-1}$  ;  
 Papier absorbant ;  
 Bêcher ;  
 Pissette.

### ❖ Mode opératoire

D'une façon générale, la verrerie doit être rigoureusement propre et rincée avec de l'eau distillée avant l'usage.-On rince plusieurs fois la cellule à conductivité, d'abord avec de l'eau distillée puis en la plongeant dans un récipient contenant de l'eau à examiner.

-La mesure est faite dans un deuxième récipient en prenant soin que les électrodes de platine soient complètement immergées.

On agite le liquide (barreau magnétique) afin que la concentration ionique entre les électrodes soit identique à celle du liquide ambiant. Cette agitation permet aussi d'éliminer les bulles d'air sur les électrodes. Le résultat est donné directement en  $\mu\text{s/cm}$  [22].

### **III.3.1.4. Détermination des matières en suspension MES**

La détermination des matières en suspension dans l'eau s'effectue par filtration ou par centrifugation. Quelle que soit la méthode choisie, il est nécessaire pour obtenir une reproductibilité satisfaisante de respecter rigoureusement les conditions opératoires et d'utiliser le même type de matériel. Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de filtration sur fibre de verre.

#### **❖ Principe**

L'eau est filtrée et le poids de matières retenues par le filtre est déterminé par pesée différentielle.

#### **❖ Matériels :**

Papier filtre ;  
Dessiccateur ;  
Fiole de 100ml

#### **❖ Mode opératoire**

On lave le disque de filtration à l'eau distillée, puis on le sèche à 105°C jusqu'à masse constante (2 heures).Après passage au dessiccateur, on le pèse à 0,1 mg. On le met en place sur l'équipement de filtration. Ensuite, on verse l'échantillon sur le filtre et on le laisse essorer. Après, on le met dans l'étuve à 105 ° pour le séchage. Après refroidissement du filtre au dessiccateur, on le pèse à 0,1 mg près, jusqu'à masse constante.

#### **❖ Expression des résultats**

La teneur de l'eau en matières en suspension (mg. L<sup>-1</sup>), est donné par l'expression:

$$\text{MES} = (\text{Pp}-\text{Pv} / \text{Vech.}) 1000\text{mg/l}$$

Pp: Poids plein du filtre.

Pv: Poids vide du filtre.

V:volume de la prise d'essai [71].

### **III.3.1.5. Résidu sec**

#### **❖ Principe**

Cette mesure permet d'évaluer la teneur des matières dissoutes et en suspension déterminée par pesée. Une certaine quantité d'eau est évaporée soit à 105 ou 180 °C dans une coupelle tarée. Le résidu desséché est ensuite évalué par pesée. Analyse 6 pages

- Résidu sec > 1500 mg/l : eau riche en sels minéraux ;
- 1500mg/l > résidu sec >500mg/l : eau moyennement minéralisée ;
- 500mg/l > résidu sec >50mg/l : eau faiblement minéralisée ;
- Résidu sec < 50mg/l : eau très faiblement minéralisée.

#### **❖ Matériels :**

Une capsule en porcelaine ;

Fiole de 100ml ;

Dessiccateur ;

Etuve ;

Balance de précision de  $\pm 0,1$ mg.

#### **❖ Mode opératoire**

- Tarer une capsule en porcelaine préalablement lavée, rincée à l'eau distillée et séchée à 105°C pendant 2h (Pv).
- Prélever 100ml d'eau à analyser dans une fiole jaugée et déverser la dans la capsule en porcelaine.
- Porter celle-ci à ébullition jusqu'à évaporation à sels humides sur une plaque chauffante
- Ensuite, poursuivre l'évaporation totale de l'eau et à sec, dans l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant.
- Laisser refroidir pendant ¼ d'heure au dessiccateur.
- Peser immédiatement et rapidement (Pp).

#### **❖ Expression des résultats**

Les résultats sont donnés en mg/l.

$$Rs = [(Pp - Pv) / Vech] \times 1000 \text{mg/l}$$

Où :

Pp : est le poids plein de la capsule après évaporation totale de l'eau et séchage à 105°C.

Pv : est le poids vide de la capsule.

Vech : est le volume d'eau.

### **III.3.1.6. Indice de Langelier ou indice de saturation**

C'est l'étude de l'équilibre carbonique d'une eau calcaire; il fait intervenir tous les équilibres qui existent à une température donnée entre les ions  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $H_2CO_3$ , ce qui se ramène à établir une relation entre le pH, le titre hydrométrique calcique, l'alcalinité et la température.

L'indice de saturation de Langelier est égale à la différence entre le pH actuel de l'eau et le pH de saturation (pH auquel elle ne serait ni entartrant ni corrosive) ce pH de saturation  $pH_s$  s'obtient à partir de la température, la dureté calcaire, l'alcalinité au méthylorange ou l'alcalinité complète (TAC) et la teneur en solides totaux dissous [71].

**Tableau III .2:** Les paramètres de Langelier.

<b>pH de saturation</b>	<b>Tendance de liant</b>
pH - $pH_s > 0$	Eau entartrant
pH = $pH_s$	Eau neutre
pH - $pH_s < 0$	Eau corrosive

#### ❖ Réactifs utilisés

Carbonate de calcium ;

Eau brute ;

Eau distillée.

#### ❖ Matériels

PH mètre.

Agitateur ;

Bêcher.

### ❖ Mode opératoire :

On prend 25ml de l'eau brute puis on lui joute 1g de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) ;

Agitation pendant 10 min ;

On mesure le pHs d'équilibre.

### ❖ Expression des résultats :

Le LSI est exprimé par la différence entre le pH initial de l'eau ( $\text{pH}_i$ ) et le pH de saturation ( $\text{pH}_s$ ):

$$\text{LSI} = \text{pH}_i - \text{pH}_s$$

### III.3.2. Paramètre physico-chimique étudiés (Titrimétrie ou volumétrie)

#### ❖ Principe

La titrimétrie ou titrage est une technique de dosage utilisée en chimie analytique afin de Déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution (ou titre d'une solution).

Les déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide ou par une base minérale diluée, en présence d'un indicateur coloré [70].

#### III.3.2.1. Détermination de l'alcalinité (TA et TAC)

#### ❖ Principe

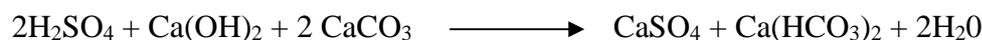
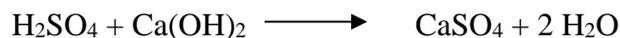
Le titre alcalimétrique (TA) rend compte de la concentration d'une eau en ions carbonate  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{OH}^-$ , le titre alcalimétrique complet ou total (TAC) rend compte de la concentration des ions carbonate  $\text{CO}_3^{2-}$ , hydrogénocarbonate  $\text{HCO}_3^-$  et hydroxyde  $\text{OH}^-$  contenues dans une eau. Lorsque le pH de l'eau est inférieur à 8,3, uniquement le TAC est mesuré par un titrage avec une solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en présence d'un indicateur coloré, le méthyle orange. Dans le cas où le pH est supérieur à 8,3, on procède à deux mesures successives:

- Titrage avec  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en présence de phénolphtaléine permet de mesurer le TA ;
- Addition de méthyle orange et poursuite du titrage jusqu'à au virage du milieu en jaune orangé pour mesurer le TAC [12].

### Réactions chimiques du TA:



### Reactions chimiques du TAC:



#### ❖ Réactifs utilisés

Solution de phénolphtaléine à 1% dans l'éthanol;

Solution de méthyle orange 1% ;

Acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.02N.

#### ❖ Matériels

Burette de 25 ml

Erlenmeyer de 250ml

Pipettes de 2ml, de 5ml et de 10ml.

#### ❖ Mode opératoire

Prélever 25 ml de l'eau à doser et les placer dans un erlenmeyer .si le pH est supérieur à 8,3  
Ajouter 2 gouttes de phénolphtaléine puis titrer par addition successive d'une solution acide  
contenue dans la burette ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), jusqu'à l'obtention d'une solution de couleur faiblement  
rosée. On note le volume  $V'$  correspondant à la mesure de TA. Puis ajouter quelques gouttes de  
méthyle orange et compléter le titrage avec  $\text{H}_2\text{SO}_4$  jusqu'au virage de couleur du jaune au  
jaune orangé. Noter le volume ( $V''$ ) de TAC.

Si avant toute addition d'acide, la phénolphtaléine reste incolore, alors le TA est nul (il n'y a  
pas de "bases fortes" dans l'eau).on procède directement à la mesure de TAC tel que  
précédemment décrit.

Le titrage est refait 3 fois, puis la moyenne est calculée pour les trois résultats.

### ❖ Expression des résultats :

$$\text{TAC} = \frac{0.02(a-b)}{V_{ech}} * 50 * 1000\text{mg/L de CaCO}_3$$

a : volume total de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> versé au deux virages pour l'échantillon d'eau ;

b : volume de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> versé pour le blanc (eau distillée).

(10mg/l de CaCO<sub>3</sub> = 1°F)

### III.3.2.2. Dosage de la dureté totale (TH)

Le dosage de la dureté totale est effectué par la méthode titrimétrique à l'EDTA. Cette méthode n'est pas applicable aux effluents et aux eaux de mer et aux eaux ayant une forte teneur en sels. La plus faible teneur qui peut être déterminée est de 0,05mmole.L-1, donc applicable pour les eaux souterraines, les eaux de surface et les eaux de boisson.

### ❖ Principe

Les alcalinoterreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe du type chélate par le sel disodique de l'acide éthylènediamine 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.

### ❖ Réactifs utilisés

Solution tampon ammoniacal de pH=10 ;

Noir erriochrome en poudre (NET), indicateur ;

EDTA-Na<sub>2</sub> (0,02N) solution acide éthylène diamine tétra acétique di-sodique (Na<sub>2</sub>C<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

### ❖ Matériels

Burette de 25 ml ;

Erlenmeyer de 250ml ;

Pipettes de 2ml, de 5ml et de 10ml.

Spatule

### ❖ Mode opératoire

On introduit 25 ml d'eau à analyser dans un erlenmeyer de 250 ml, on ajoute 2 ml de solution tampon et une pincée de noir ériochrome T (NET). 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. Après, on vérifie que la coloration ne change plus par l'addition d'une goutte supplémentaire d'EDTA.

Le titrage est refait 3 fois puis le moyen est calculé pour les trois résultats

### ❖ Expression des résultats

La teneur globale en calcium et en magnésium  $C_{Ca + Mg}$ , exprimé en milligramme par litre est donnée par l'équation:

$$TH = \frac{0.02 \cdot (a - b)}{V_{ech}} * 50 * 1000 \text{ mg/L de CaCO}_3$$

a : volume de l'EDTA versé pour l'échantillon d'eau ;

b : volume de l'EDTA versé pour le blanc (eau distillée).

(10 mg/l de  $\text{CaCO}_3 = 1^\circ\text{F}$ ).

$V_{ech}$  : volume d'eau analysée.

### III.3.2.3. Détermination de la dureté calcique ( $TH_{Ca}$ )

#### ❖ 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, de Murexide.

#### ❖ Réactifs utilisés

Solution hydroxyde de sodium NaOH (1N) ;

EDTA- $\text{Na}_2$  (0,02N) solution acide éthylène diamine tétra acétique di-sodique

Murexide 1% dans NaCl (0,5g de murexide pulvérisé dans 49,5g de NaCl).

#### ❖ Matériels

Burette de 25 ml ;  
Erlenmeyer de 250ml ;  
Pipettes de 2ml, de 5ml et de 10ml ;  
Spatule.

### ❖ Mode opératoire

A l'aide d'une pipette, on introduit 25ml de l'échantillon préparé dans une fiole conique de 250ml. On ajoute 1ml de solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) et une pincée de l'indicateur Murexide. On mélange et on dose immédiatement. Ensuite, on ajoute la solution d'EDTA tout en continuant d'agiter. Le virage est atteint lorsque la couleur devient pourpre.

### ❖ Expression des résultats

La teneur en calcium  $C_{Ca}$  exprimé en  $mg.L^{-1}$ , est donnée par l'équation:

$$TH = \frac{0.02 * (a-b)}{V_{ech}} * 50 * 1000 \text{ mg/L de CaCO}_3$$

a : volume de l'EDTA versé pour l'échantillon d'eau ;

b : volume de l'EDTA versé pour le blanc (eau distillée) ;

(10mg/l de  $CaCO_3 = 1^\circ F$ )

$V_{ech}$  : volume d'eau analysée.

### III.3.2.4. Détermination de la dureté magnésienne ( $TH_{Mg}$ )

La dureté magnésienne est par définition la concentration en sel de magnésium. Elle se déduit de la relation de la dureté totale qui est égale à la somme des deux duretés calcique et magnésienne.

$$TH = TH_{Ca} + TH_{Mg} \text{ en mg de CaCO}_3 \text{ et } TH_{Mg} = TH - TH_{Ca} \text{ [71].}$$

### III.3.2.5. Dosage des chlorures (Cl<sup>-</sup>) par la méthode de « MOHR »

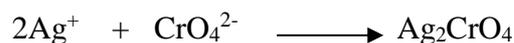
#### ❖ Principe

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrates d'argent en présence de bichromates de potassium (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) comme indicateur :

Les ions chlorures réagissent avec les ions argent pour former du chlorure d'argent insolubles, qui se précipitent quantitativement selon la réaction suivante:



Quand tous les ions chlorure ont été précipités, le chromate d'argent précipite à son tour selon la réaction suivante:



Et le mélange prend une teinte rouge brique. Le précipité Ag<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> apparaît ainsi comme un indicateur de la fin de précipitation des ions chlorure [71].

#### ❖ Matériels utilisés

Burette graduée;

Erlenmeyer ;

Fiole jaugé de 25 ml.

#### ❖ Réactifs utilisés

Solution d'AgNO<sub>3</sub> à 0,02 N;

Solution de K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>.

#### ❖ Mode opératoire

A l'aide d'une pipette, introduire 25 ml de l'échantillon préparé dans un erlenmeyer, ajouter 1 à 2 gouttes l'indicateur de chromate de potassium et titrer la solution par addition goutte à goutte de nitrate d'argent jusqu'à ce que la solution prenne une couleur brun rougeâtre (précipité rouge brique), on note le volume équivalent V.

### ❖ Expression des résultats :

$$[\text{Cl}^-] = \frac{0.2(a-b)}{V_{ech}} \quad 35450\text{mg/L}$$

a : volume total de  $\text{AgNO}_3$  versé pour l'échantillon d'eau ;

b : volume de  $\text{AgNO}_3$  versé pour le blanc (eau distillée)

### III.3.3. Analyse par spectrophotométrie (UV-visible)

La spectrophotométrie (UV-Visible) est une méthode d'analyse quantitative fondée sur la mesure de la quantité d'énergie absorbée par la molécule traversée par un faisceau de la lumière monochromatique. Un monochromateur placé dans la trajectoire optique permet de sélectionner une longueur d'onde spécifique du rayonnement absorbé par l'élément à doser. L'intensité de cette absorption est en fonction de la concentration de l'espèce absorbant, elle est exprimée par la loi de Beer-Lambert:

$$A = \log (I/I_0) = \epsilon \cdot L \cdot C$$

A: Absorbance;

$I_0$ : Intensité initiale;

I: Intensité transmise;

L: Epaisseur de la cellule de mesure;

$\epsilon$ : Coefficient d'absorptivité des particules dissouts;

C: La concentration de la solution en particule considérés.

### ❖ Principe

Il est fondé sur la détermination de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde. On utilise donc un système de type monochromateur pour fixer la longueur d'onde et un photomultiplicateur vient enregistrer l'absorbance correspondante. Il suffit de faire varier la longueur d'onde sur une plage adéquate pour obtenir un spectre.

Une source de lumière est rendue monochromatique à travers un système dispersant (prisme) ou un système diffractant (réseau). Le faisceau est dédoublé. Un faisceau traverse la cuve et l'autre sert de référence (passe à travers une cuve de solvant). Un photomultiplicateur

enregistre le spectre de transmission  $T = I / I_0$  puis traite l'information de façon à donner l'absorption. Le spectre est ensuite affiché et traité par un ordinateur qui détermine les différentes longueurs d'onde d'absorption maximale ainsi que les absorptions correspondantes.

### ❖ Protocole de mesure de l'absorbance :

Pour mesurer l'absorbance  $A$  d'une substance colorée en solution aqueuse à une longueur d'onde donnée :

- On place, dans le spectrophotomètre, une cuve en plastique (milieu aqueux et domaine du visible, en verre (visible) ou en quartz (UV) quel que soit le milieu, contenant la solution de référence ;
- On sélectionne la longueur d'onde,
- On fait le « blanc » (on dit aussi : on règle le zéro du spectrophotomètre):  $A$  (solution de référence + cuve) = 0 ;
- On place, dans le spectrophotomètre, une cuve identique à celle de la référence contenant la solution de la substance colorée à analyser.
- On lit la valeur de l'absorbance  $A$ . par comparaison au blanc.

### ❖ Méthode de la courbe d'étalonnage :

C'est une méthode universelle graphique appliquée en UV-VISIBLE. Elle est basée sur la mesure des absorbances d'une série de solutions étalons dont les concentrations sont connues, et qui permettent de tracer la courbe étalonnage  $A = f(C)$ .

#### III.3.3.1. Dosage de la silice ( $\text{SiO}_2$ )

### ❖ Principe

A un pH compris entre 2,3 et 2,4, l'acide silicique dissout forme avec le molybdate d'ammonium un complexe jaune de molybdate silicique. Lorsqu'il est réduit avec le complexe ANS augmentant la sensibilité de l'analyse, on obtient une couleur bleu avec formation de l'azur de molybdate [74].

### ❖ Réactifs utilisés:

Etalon commercial de silicate de sodium à 1000mg/l (SCP SCIENCE Canada,

1000mg/l, H<sub>2</sub>O/tr. HF) ;

Acide chlorhydrique HCl concentré à (50%) ;

Solution de molybdate d'ammonium;

Solution d'acide oxalique.

### ❖ Matériels

06 Tubes à essai de 25 ml ;

Porte tubes ;

3 fioles jaugées de 100ml ;

Pipettes de 2ml, de 5ml et de 10ml ;

02 cuves de mesure.

### ❖ Préparation de la solution fille à 10mg/l de Si<sup>4+</sup> :

Nous prélevons 1ml de la solution mère à 100mg/l dans une fiole de 100ml, et nous complétons jusqu'au trait de jauge avec l'eau distillée.

### ❖ Préparation de la solution standard à 1 mg/l de Si<sup>4+</sup> :

Nous prélevons 10ml de la solution fille à 10mg/l de Si dans une fiole de 100ml et nous complétons jusqu'au trait de jauge avec l'eau distillée.

### ❖ Préparation des étalons de silicate :

Dans une série de tubes à essais de 25ml, on introduit à l'aide d'une pipette 0, 1, 2, 3, 4, 5 ml de la solution standard à 1mg/l, on complète jusqu'à 10ml avec l'eau distillée en utilisant une pipette de 10 ml.

N° de fiole	1	2	3	4	5	6
C (mg/l)	blanc	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Vsol standard (ml)	0	1	2	3	4	5
Veau distillée (ml)	10	9	8	7	6	5

### ❖ Courbe d'étalonnage :

On verse 10ml d'étalon dans les tubes à essai et on ajoute 0.2ml d'acide chlorhydrique, puis 0.4ml de la solution molybdate d'ammonium, on agite pour bien mélanger et on laisse au repos pendant 7min, puis on ajoute 0.4ml de la solution d'acide oxalique et on agite quelques minutes. Une coloration jaune claire se développe. On mesure l'absorbance après quelques minutes (15min), après l'addition de l'acide oxalique, car le complexe molybdate-silicate est plus stable au bout d'un certain temps.

Par la suite, on mesure l'absorbance de chacun des étalons à  $\lambda = 410\text{nm}$  par rapport au blanc préparé dans les mêmes conditions mais ne contenant le silicium.

### ❖ Dosage de l'échantillon d'eau :

On introduit 10ml d'eau brute dans un tube à essai propre et sec, puis on ajoute 0.2ml d'acide chlorhydrique, ensuite 0.4ml de la solution molybdate d'ammonium, on agite et on le laisse reposer 7min, puis on ajoute 0.4ml de la solution d'acide oxalique et on agite quelques instants puis on laisse au repos pendant quelques minutes (15min).

Après, on mesure l'absorbance de l'échantillon ainsi préparé par rapport au blanc. La concentration en silice est déterminée à partir de l'équation de la courbe d'étalonnage.

### III.3.3.2.Détermination des nitrates

#### ❖ Principe

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitro salicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage spectrométrique à 415nm.

#### ❖ Matériel

Capsule de 60mL environ ;  
Bain-marie ou plaque chauffante.

#### ❖ Réactifs

Solution de salicylate de sodium à 10g/L à renouveler toutes les 24h ;  
Acide sulfurique concentré ( $d=1.84$ ) ;

- Solution d'hydroxyde de sodium :
  - Hydroxyde de sodium 20g
  - Sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique 5g

- Eau dé-ionisée q .S.P 100ml

Dissoudre avec précaution l'hydroxyde de sodium dans 80mL d'eau distillée ; ajouter le sel sodique EDTA .Après dissolution et refroidissement, transvaser la solution dans une fiole jaugée de 100 cc, ajuster le volume à 100ml avec l'eau distillée.

Conserver cette solution dans un flacon de polyéthylène.

- Solution d'azoture de sodium :
  - Azoture de sodium 25mg
  - Eau distillée q.s.p 100mL
- Solution mère étalon d'azote nitrique à 100 mg/L :
  - Nitrate de sodium anhydre 34 ,6 mg
  - Eau distillée q.s.p 250 mL
- Solution fille étalon d'azote nitrique à 10mg /L

Prélever avec une pipette de 10cc, un volume précis de 10mL de la précédente solution mère dans une fiole jaugée de 100cc, puis compléter avec l'eau distillée.

### ❖ Préparation de la solution étalon et dosage des nitrates

#### ❖ Mode opératoire

Dans une capsule en porcelaine de 60mL, introduire successivement :

- 10 ml d'une Solution étalon d'azote nitrique 10mg/l
- Ajouter 0,5ml d'une Solution d'azoture de sodium
- Ensuite ajouter 0,2 ml d'Acide acétique pur à 100%
- Agiter en tournant légèrement la capsule avec la main, afin d'homogénéiser le mélange .attendre 5min puis évaporer modérément à sec au bain-marie ou sur une plaque chauffante réglée à 80°C(ne pas surchauffer ni chauffer trop longtemps).
- Ajouter 1mL de solution de salicylate de sodium, mélanger puis évaporer a sec sans calcination ' à sels humides) sur la plaque chauffante. Laisser refroidir.
- Reprendre le résidu par 1mL d'acide sulfurique concentré ayant soin de l'humecter complètement.
- Attendre 10 minutes, puis ajouter 15mL d'eau distillée et 10mL de solution d'hydroxyde de sodium qui développe la couleur jaune. agiter la solution à la main avant d'effectuer la lecture au spectromètre à la longueur d'onde de 415nm, par

rapport au blanc (l'eau distillée). On mesure ainsi l'absorbance de la solution étalon  $A_e$ .

Préparation de la solution de l'échantillon d'eau et dosage des nitrates dans l'eau naturelle

### ❖ Mode opératoire :

- Introduire 10mL d'eau naturelle dans une capsule de 60 mL (pour des teneurs en azote nitrique supérieures à 10mg/L, opérer une dilution).
- Alcaliniser faiblement avec 1ml de la solution d'hydroxyde de sodium .Poursuivre de dosage comme pour la courbe d'étalonnage, en suivant les mêmes étapes que précédemment :
  - Ajouter 0.5 ml d'une solution d'azoture de sodium
  - Ensuite ajouter 0.2ml d'Acide acétique pur à 100%
- Agiter en tournant légèrement la capsule avec la main, afin d'homogénéiser le mélange. attendre 5minutes puis évaporer modérément à sec au bain-marie ou sur une plaque chauffante réglée à 80°C (ne pas surchauffer trop longtemps).
- Ajouter 1mL de solution de salicylate de sodium ,mélanger puis évaporer à sec sans calcination (à sels humides ) sur la plaque chauffante .laisser refroidir .
- Reprendre le résidu par 1ml d'acide sulfurique concentré ayant soin de l'humecter complètement.
- Attendre 10 minutes, puis ajouter 15ml d'eau distillée et 10ml de solution d'hydroxyde de sodium qui développe la couleur jaune .Agiter la solution à la main avant d'effectuer la lecture au spectromètre à la longueur d'onde de 415nm , par rapport au blanc (l'eau distillée) . On mesure ainsi l'absorbance de l'échantillon inconnue d'eau naturelle  $A_i$ .

### ❖ Expression des résultats :

en appliquant la loi de Beer-Lambert  $A = \epsilon C$  , on peut par comparaison de l'absorbance de l'échantillon d'eau naturelle avec celle de l'étalon de nitrates , on obtient la relation exprimant la concentration en nitrates dans l'eau naturelle ,

$$[\text{NO}_3^-] \text{ (mg/L)} = \frac{A_i}{A_e} * 10 \text{ mg /L}$$

### **III.3.4. Analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)**

En chimie analytique, la spectrométrie d'absorption atomique (Atomic absorption spectroscopy en anglais ou AAS) est une technique de spectroscopie atomique servant à déterminer la concentration de certains métaux dans un échantillon. Elle peut servir à mesurer la concentration de plus de 60 métaux différents en solution. Elle fait partie des méthodes classiques d'analyse en chimie analytique. Basée sur le principe de la spectrophotométrie, elle conduit beaucoup plus à des données quantitatives. L'absorption est utilisée généralement pour faire un dosage, l'élément est connu, on détermine sa concentration par rapport à des étalons.

L'analyse se base sur l'absorption de photons par des atomes à l'état fondamental, et on utilise à cet effet en général des solutions sauf dans le cas des hydrures.

La détermination spectroscopique d'espèces atomiques peut seulement être réalisée à partir d'un échantillon à l'état gazeux, dans lequel les atomes individuels comme l'Ag, l'Al, l'Au, le Fe et le Mg sont nettement séparés les uns des autres.

#### **III.3.4.1. Dosage du Fer par SAA**

Le fer peut se rencontrer dans l'eau sous différentes formes. Dans les conditions habituelles, c'est-à-dire pour un pH variant entre 4,5 et 9, le fer soluble présent est généralement à l'état ferreux. Si le milieu est réducteur comme dans beaucoup d'eaux souterraines, le fer ferreux peut atteindre des teneurs élevées. En l'absence de complexes, le fer ferrique n'est soluble d'une façon significative qu'à des pH inférieurs à 3. Pratiquement, les eaux superficielles n'en contiennent que très peu, rarement plus de 1mg/L.

En effet, sous l'action de l'air, ou par addition de chlore, le fer est oxydé à l'état ferrique et peut être hydrolysé pour donner un hydroxyde de fer insoluble. C'est généralement sous cette forme qu'on le trouve dans les échantillons, sauf si le prélèvement a été pratiqué de telle façon qu'il ne se produise aucune oxydation.

### **III.3.4.2. Dosage du plomb par SAA**

La teneur en plomb dans les eaux de distribution s'explique fréquemment par la présence de ce métal dans les canalisations ou dans les vannes ou autres accessoires que l'on trouve dans les réseaux. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte, comme le pH et la température de l'eau. Le plomb peut se trouver sous plusieurs formes : soluble, particulaire et dépôt instable. Dans ces conditions et compte tenu de l'hétérogénéité de la teneur en plomb dans le temps, il y a lieu de prendre un certain nombre de précautions lors du prélèvement.

### **III.4. Analyses bactériologiques**

L'analyse bactériologique a pour but de mettre en évidence la présence des germes, basés sur la recherche et la numération de celles-ci dans les échantillons à analyser. L'analyse n'est pas seulement qualitative mais aussi quantitative [74].

Il faut signaler qu'un examen bactériologique ne peut être interpréter que s'il est effectué sur un échantillon correctement prélevé dans un récipient stérile, selon un mode opératoire précis évitant toutes

Les contaminations accidentelles, correctement transporté au laboratoire et analysé sans délai ou après une courte durée de conservation dans des conditions satisfaisantes.

#### **❖ Matériel :**

Pipette Pasture ;

Micropipette ;

Bec bunsen ;

Boîtes pétries ;

Embouts ;

Etuve ;

Tubes à essais ;

Autoclave.

### ❖ Milieux de cultures

Un milieu de culture doit satisfaire à toutes les exigences nutritives des micro-organismes :

- apport de la source d'énergie, de carbone, d'azote ;
- besoins en ions minéraux, en facteurs de croissance ;
- pH et force ionique voisins de la valeur optimum.

Il peut se présenter sous forme liquide ou solide, par addition d'agar (intérêt : fusion au-delà de 80°C et possibilité de le maintenir en surfusion à 45°C, température compatible avec l'incorporation de micro-organismes ; pas d'hydrolyse de l'agar par les microorganismes).

#### a) Le milieu Plate Count Agar(PCA)

##### ✓ **Domaine d'utilisation**

La gélose glucosée à l'extrait de levure, appelée par les Anglo-Saxons "Plate Count Agar" ou PCA, est utilisée en bactériologie alimentaire pour le dénombrement des bactéries aérobies psychrotrophes, mésophiles dans le lait, les viandes, les produits à base de viande, l'eau, les autres produits alimentaires, ainsi que pour l'analyse des produits pharmaceutiques, des produits cosmétiques et de leurs matières premières.

##### ✓ **Principe**

Les substances nutritives apportées par la Tryptone, les facteurs vitaminiques de l'extrait de levure et le glucose (source énergétique) favorisent la croissance de la plupart des bactéries à dénombrer.

**Tableau III.3** : composition de la Gélose de dénombrement PCA (pour 1L)

Compositions	Quantité (g)
Tryptone	5
Extrait autolytique de levure	2.5
Glucose	1
Agar bactériologique	12

pH du milieu est prêt à l'emploi à 25 °C : à 7,1±0.2

**b) Le milieu Gélose lactosée au désoxycholate (LDC)**

✓ **Domaine d'utilisation**

La gélose lactosée au désoxycholate est un milieu sélectif utilisé pour le dénombrement des bactéries coliformes dans les eaux, le lait, les produits laitiers et les autres produits alimentaires. Ce milieu est également employé pour la différenciation et l'isolement des entérobactéries à partir des prélèvements d'origine animale.

✓ **Principe**

L'inhibition des microorganismes à Gram positif est essentiellement due à l'action du désoxycholate de sodium, bien que le citrate de sodium soit également un inhibiteur efficace.

- La différenciation des entérobactéries est fondée sur la capacité de ces germes à fermenter le lactose. Les microorganismes lactose-positif produisent une acidification qui, en présence de rouge neutre, se manifeste par l'apparition de colonies rouges. Les germes lactose-négatif donnent des colonies incolores (Salmonella et Shigella).

**Tableau III.4 :** composition de la Gélose lactosée au désoxycholate (LDC) (pour 1L)

Compositions	Quantité (g)
Peptone pepsique de viande	10
Lactose	10
Désoxycholate de sodium	0,5
Chlorure de sodium	5
Citrate de sodium	2,0
Agar agar bactériologique	15,0
Rouge neutre	0,03

pH du milieu est prêt l'emploi à 25°C : à 7,1± 0,2.

**c) Gélose glucosée à l'oxytétracycline (base OGA)**

✓ **Domaine d'utilisation**

La gélose glucosée à l'oxytétracycline est utilisée pour la recherche et le dénombrement des levures et des moisissures dans les produits alimentaires et les produits cosmétiques.

### ✓ Principe

- La croissance des levures et des moisissures est favorisée en présence de glucose et d'extrait de levure.
- L'addition extemporanée d'oxytétracycline ou de chloramphénicol ou de chloramphénicol + gentamicine ou d'oxytétracycline + gentamicine permet d'inhiber les bactéries, y compris les lactobacilles (microorganismes acidophiles qui sont susceptibles de représenter la flore dominante de certains produits alimentaires).

**Tableau III.5 :** composition de la gélose glucosée à l'oxytétracycline (OGA) (pour 1L)

Compositions	Quantité (g)
Extrait autolytique de levure	5,0
Glucose	20,0
Oxytétracycline.	0,1
bactériologique	15,0

pH du milieu prêt à l'emploi à 25°C : à  $6,6 \pm 0,2$ .

### d) Gélose EMB (LEVINE)

#### ✓ Domaine d'utilisation

La gélose EMB, préconisée originellement par Levine, est utilisée pour isoler et identifier *Escherichia coli* et *Enterobacter*, ainsi que les bactéries intestinales à Gram négatif dans les produits pharmaceutiques, les produits laitiers et les autres produits alimentaires. Elle est également employée pour le contrôle des eaux comme milieu d'isolement et d'identification après culture en milieu liquide (test présomptif).

#### ✓ Principe

- L'éosine Y et le bleu de méthylène sont des agents faiblement sélectifs. Ils n'inhibent que partiellement le développement des microorganismes à Gram positif tels que les entérocoques.

- Ces colorants assurent la différenciation entre les germes lactose-positif et les germes lactose-négatif. Les coliformes donnent des colonies violettes à brunes tandis que les salmonelles sont incolores, transparentes ou ambrées.

**Tableau III.6** : composition de la gélose (MEB) (pour 1L)

Compositions	Quantité (g)
Peptone pancréatique de gélatine	10,0
Lactose	10,0
Phosphate dipotassique	2,0
Eosine Y.	0,4
Bleu de méthylène	65,0
Agar agar bactériologique	15,0

pH du milieu prêt à l'emploi à 25°C : à  $7,0 \pm 0,2$ .

### e) Bouillon lactosé au BCP

#### ✓ **Domaine d'utilisation**

Le bouillon lactosé au pourpre de bromocrésol (BCP) est utilisé comme milieu présomptif de détection des bactéries coliformes dans l'eau.

#### ✓ **Principe**

- La Tryptone et l'extrait de viande apportent les éléments nutritifs azotés nécessaires à la croissance des bactéries. - La fermentation du lactose est mise en évidence par l'acidification du milieu qui provoque le virage au jaune de l'indicateur pH (pourpre de bromocrésol), ainsi que par la production de gaz dans les cloches de Durham.

- Pour confirmer la présence de coliformes, il est nécessaire de pratiquer des subcultures sur les milieux confirmatifs appropriés.

**Tableau III.7** : composition de bouillon lactosé (BCP) (pour 1L)

Compositions	Quantité (g)

Tryptone	5,0
Extrait de viande	3,0
Lactose	5,0
Pourpre de bromocrésol..	25,5

pH du milieu prêt à l'emploi à 25°C : à  $6,7 \pm 0,2$ .

### ❖ Analyse microbiologique

#### III.4.1. Flore totale aérobies mésophiles (FTAM)

Pour le dénombrement des germes totaux, la technique d'ensemencement dans la masse avec les milieux PCA et OGA a été utilisée

#### ❖ Mode opératoire

- Allumez le bec bunsen et manipulez dans la zone de la flamme ;
- Versez une quantité suffisante de milieu PCA dans les boites de pétri stériles et laisser solidifier ;
- A l'aide d'une micropipette déposer 0.1 ml d'échantillon à analyser sur la surface de milieu ;
- Etaler l'échantillon sur toute la surface de milieu à l'aide d'une pipette râteau ;
- Incuber les boites ensemencées à l'étuve à 30°C pendant 48h pour le milieu PCA ;
- Incuber les boites ensemencées à l'étuve à 25°C pendant 48 -72h pour le milieu OGA
- Dénombrer les colonies apparues.

#### III.4.2. Coliforme totaux et coliformes thermo tolérant (E.coli)

Pour le dénombrement des coliformes totaux et fécaux, nous avons utilisé la méthode par ensemencement en milieu liquide.

##### ➤ Test présomptif sur milieu BCPL et l'eau peptonnee

- Ensemencer 1 ml de chaque échantillon dans 10 ml de milieu BCPL et 1 ml de chaque échantillon dans l'eau peptonnee contenant une cloche de Durham ;
- Mélanger bien puis incuber à 37°C pendant 48h :

- un changement de couleur du pourpre vers le jaune et la présence du gaz dans la cloche est considéré comme un résultat positif ( pour le milieu BCPL).
- L'ajoute de quelque goutte de réactif de KOVOS, apparition d'un anneau rouge considéré comme un résultat positif (pour le l'eau peptonnee).

### ➤ **Test confirmatif sur milieu LDC et sur le milieu EMB**

- Préparer deux boites pour chaque échantillon pour LDC
- Déposer 1 ml de chaque échantillon au fond des boites de pétri;
- Versez une quantité suffisante de milieu LDC puis mélanger bien avec des mouvements en huit et laisser solidifier ;
- Ajoutez une deuxième couche de milieu LDC avec la même méthode et laisser solidifier ;
- Incuber la moitié des boites à 37°C (coliforme totaux) et les autres à 44°C (coliformes thermo tolérants) pendant 48h
- Dénombrer les colonies apparues.
- Préparer deux boites pour chaque échantillon pour
- Versez une quantité suffisante de milieu EMB puis mélanger bien avec des mouvements en huit et laisser solidifier ;
- Ajoutez 1 ml de chaque échantillon sur la couche de milieu LDC puis Etalez avec un râteau
- Incuber des boites à 37°C ;
- Dénombrer les colonies vers métallique apparues.

### **III.5. Traitement de l'eau brute**

Il existe plusieurs traitements de l'eau naturelle, dans notre cas on choisit un traitement qui est la coagulation-floculation (jar test) par le plan d'expérience

#### **III.5.1.Coagulation-floculation**

La coagulation-floculation est un procédé physico-chimique visant la déstabilisation des particules colloïdales présente dans l'eau, puis formation de flocs par absorption et agrégation. Les flocs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite [75].

### **III.5.1.1. La coagulation**

#### ✓ **Le principe:**

Le mot coagulation vient du latin coagulare qui signifie « agglomérer », les particules colloïdales en solution sont naturellement chargées négativement. Ainsi, elles tendent à se repousser mutuellement et restent en suspension. On dit qu'il y a stabilisation des particules dans la solution. La coagulation consiste dans la déstabilisation des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives. On utilise, pour ce faire, des réactifs chimiques nommés coagulants [75].

L'adjonction du coagulant produit dans un premier temps un ensemble de réactions complexes d'hydrolyse, d'ionisation et également de polymérisation et dans un second temps, une déstabilisation des colloïdes par un ensemble de mécanismes complexes [76].

### **III.5.1.2. La floculation**

#### ✓ **Le principe :**

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 des contacts entre les particules, lesquelles sont provoquées par la différence de vitesse entre ces particules [12].

Ce phénomène est pour la formation de floes de taille plus importante. On utilise, pour ce faire, des flocculants.

Comme pour la coagulation, il existe un certain nombre de paramètres à prendre en compte pour le bon fonctionnement de ce procédé. Le mélange doit être suffisamment lent afin d'assurer le contact entre les floes engendrés par la coagulation. En effet, si l'intensité du mélange dépasse une certaine limite, les floes risquent de se briser. Il faut également un temps de séjour minimal pour que la floculation ait lieu. La durée du mélange se situe entre 10 et 60 minutes [77].

### III.5.1.3. JART-TEST

Depuis plus de 50 ans, le Jar Test est la technique standard utilisée pour optimiser l'addition de coagulants et de flocculant dans le domaine du traitement de l'eau.

Le Jar-test est un appareil composé d'une série d'agitateurs (6), contenant aussi des béchers de 1l et doté d'un dispositif de réglage simultané, de la vitesse et du temps d'agitation exprimés respectivement en tours par minute.

- **Réactifs utilisés**
- HCl 50 % ;
- NaOH 1N ;
- la chaux ( $\text{Ca(OH)}_2$  à 30g/L ;
- Le chitosane commercial poudre (99%) de CAPBRETON.

Le chitosane est un polysaccharide provenant de la désacétylation de la chitine, un composé grandement similaire à la cellulose. On retrouve la chitine dans plusieurs écosystèmes puisqu'elle est une composante fondamentale de l'exosquelette des invertébrés marins (crabe, crevette, homard, etc.) et des insectes, en plus d'être une molécule structurante chez les champignons et les levures [78].

#### **Partie I (Essais par plan d'expériences factoriel à 3 facteurs)**

##### **❖ Mode opératoire**

- Prélever dans chaque bêcheur 250ml de l'eau brute ;
- Addition des doses fixe de chaux  $\text{Ca(OH)}_2$  ( 6ml) pour tout les expériences
- Addition de la quantité variable de chitosine comme elles sont montré dans le tableau
- Procéder au réglage de la vitesse d'agitation à 45trs/mn
- Mettre l'agitation en marche avec le bouton de mise en marche.
- Contrôler le temps

##### **✓ Essais de traitement de coagulation-floculation:**

Dons notre cas de traitement, on a utilisé le plan d'expérience (plan factoriel) à 3 facteurs qui sont :  $X_1$ = masse de chitosane ;  $X_2$ = pH ;  $X_3$ = temps d'agitation, tel que  $k=3$  ;  $2^k = 2^3 = 8$

expériences ou essais qui sont représentés dans le tableau (III.8) des domaines des valeurs, suivant :

**Tableau III.8 :** domaines des limites des facteurs du plan factoriel pour la coagulation-floculation de l'eau brute d'Ibourassen

N°	X1=m chito(mg)	X2=pH	X3= t (min)
1	300mg	9	60 min
2	300mg	9	15min
3	300mg	4	60min
4	300mg	4	15min
5	50mg	9	60min
6	50mg	9	15min
7	50mg	4	60min
8	50mg	4	15min

La matrice des expériences de ce modèle factoriel sont consignée dans le tableau (III.9) ci dessus :

N° de l'essai	Valeurs des facteurs à l'échelle naturelle			Valeur fictive	Valeurs centrées réduites des facteurs			Réponses
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>		x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	
1	Z <sub>1</sub> min	Z <sub>2</sub> min	Z <sub>3</sub> min	1	-1	-1	-1	y <sub>1</sub>
2	Z <sub>1</sub> min	Z <sub>2</sub> min	Z <sub>3</sub> max	1	-1	-1	1	y <sub>2</sub>
3	Z <sub>1</sub> min	Z <sub>2</sub> max	Z <sub>3</sub> min	1	-1	1	-1	y <sub>3</sub>
4	Z <sub>1</sub> min	Z <sub>2</sub> max	Z <sub>3</sub> max	1	-1	1	1	y <sub>4</sub>
5	Z <sub>1</sub> max	Z <sub>2</sub> min	Z <sub>3</sub> min	1	1	-1	-1	y <sub>5</sub>
6	Z <sub>1</sub> max	Z <sub>2</sub> min	Z <sub>3</sub> max	1	1	-1	1	y <sub>6</sub>
7	Z <sub>1</sub> max	Z <sub>2</sub> max	Z <sub>3</sub> min	1	1	1	-1	y <sub>7</sub>
8	Z <sub>1</sub> max	Z <sub>2</sub> max	Z <sub>3</sub> max	1	1	1	1	y <sub>8</sub>

**Tableau III.9 :** Matrice du plan factoriel à 3 facteurs pour la coagulation-floculation de l'eau brute d'Ibourassen

Cette matrice sera appliquée pour les 6 paramètres physico-chimiques : TH ; TH<sub>Ca</sub> ; Cl ; TAC, Silice ; et la Conductivité,

Où la réponse est  $y=R$  (%), le rendement d'enlèvement pour chacun des paramètres, exprimé par :

$$Y= R(\%)= \frac{Vi-Vf}{Vi} \times 100$$

Vi : est la valeur du paramètre expérimentale de l'eau brute avant traitement

Vf : est la valeur du paramètre expérimentale de l'eau brute après traitement

### **Filtration :**

Après avoir laissé au repos pendant quelques heures les solutions traitées (les particules solides de floccs de chitosane doivent décanter complètement jusqu'à clarification de l'eau), les 08 échantillons d'eau brute traitée doivent être filtrés séparément au dessus d'entonnoirs munis de papiers filtres et placés dans des erlenmeyers de 250ml.

Après la filtration, on doit prélever 10ml de chacun des 8 filtrats dans un bêcher pour faire le contrôle des paramètres physicochimiques de l'eau: pH, conductivité, TH, TA et TAC, Cl, SiO<sub>2</sub>.

### **Partie II : Optimisation du procédé ( 2<sup>e</sup> plan d'expérience factoriel)**

Dans ce deuxième plan d'expérience, on cherche à optimiser notre traitement en introduisant l'influence de la température.

On opte pour un plan factoriel à 2 facteurs : X1=masse de chitosane ; X2=température.

#### **❖ Réactifs utilisés**

- NaOH 1N ;
- la chaux (Ca(OH)<sub>2</sub> à 30g/L;
- Le chitosane.

#### **❖ Mode opératoire**

- Prélever dans chaque bêcher 250ml de l'eau brute ;
- Addition des doses fixes de chaux Ca(OH)<sub>2</sub> ( 6ml) pour toutes les expériences

- Addition de la quantité variable de chitosane comme elles sont montré dans le tableau III.8
- Procéder au réglage de la vitesse d'agitation à 45trs/mn
- Mettre l'agitation en marche avec le bouton de mise en marche.
- Contrôler le temps
- ✓ **Essais de traitement de coagulation-floculation du 2<sup>e</sup> plan d'expériences :**

Pour ce cas de traitement, on a utilisé le plan d'expérience (plan factoriel) de 2 paramètres  $K=2$  ;  $2^k=2^2=4$  expériences

On a varié la masse de chitosane ( $X_1$ ) et la température ( $X_2$ ) selon le tableau III.10 des domaines des valeurs suivant :

**Tableau III.10 :** domaines des valeurs des deux paramètres du plan factoriel de l'optimisation du procédé de coagulation-floculation de l'eau brute d'Ibourassen

N° (essai)	$X_2=m_{chit}$	$X_2= TC^\circ$
1	300mg	50C°
2	300mg	20C°
3	50mg	50C°
4	50mg	20C°

### **Filtration :**

On filtre séparément les 08 échantillons d'eau brute traitée au dessus d'un entonnoir munit d'un papier filtre placé au dessus d'un erlenmeyer de 250ml.

Après la filtration, on doit prélever 10ml dans chaque bêche pour faire l'analyse (pH, conductivité, TH, TA et TAC,  $Cl^-$ ,  $SiO_2$ ).

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats et de leurs discussions. Nous interpréterons les influences des 3 facteurs du plan factoriel ainsi que leurs effets sur les rendements d'enlèvement des paramètres les plus importants, qui sont : TAC , TH,  $\text{TH}_{\text{Ca}^{2+}}$ , conductivité,  $\text{Cl}^-$ , silice, responsables de l'effet entartrant et colmatant des installations de fabrication de l'eau de procès au niveau de CEVITAL.

### -Première partie-

#### IV -1-Analyses physico-chimiques et microbiologique de l'eau brute

La qualité des eaux est évaluée par un ensemble de critères physico-chimiques et bactériologiques qui définissent leur potabilité.

- Les résultats obtenus des différents paramètres physico-chimiques sont consignés dans le tableau (IV.1) suivant :

**Tableau(IV.1) :** Les résultats obtenus des différents paramètres physico-chimiques.

Les paramètres	l'eau brute	La norme de l'OMS
Couleur	Jaunâtre	Pas de couleur
Température (°C)	20.5	25
pH	7.54	6.5-8.5
conductivité $\lambda$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	5540	2000
M E S (mg/l)	410 (turbide)	2000
Résidu sec (mg/l)	1629	1500
L S I	0.07	0
TAC (°F)	35.5	50
TH (°F)	85.5	50
$\text{TH}_{\text{Ca}^{2+}}$ (°F)	59	20
$\text{Cl}^-$ (mg/l)	638.1	250
Silice (mg/l)	19.48	12
Nitrate (mg/l)	1.54	50
Fer (mg/l)	6.16	0.3
Pb (mg/l)	1.19	0.05

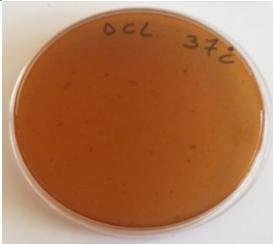
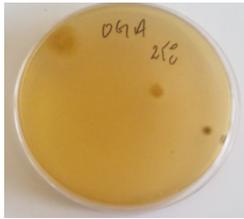
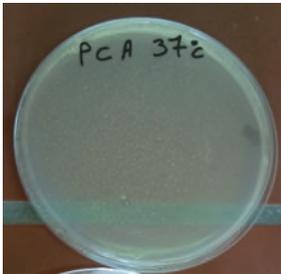
- D'après les résultats des analyses physico-chimiques, l'eau de puits présente une couleur due à la présence d'une concentration élevée en fer (6.16mg/l) qui est au

dessus de la norme de l'OMS, et de certaine matière organique comme les acides humiques.

Mais après une décantation effectuée sur l'échantillon d'eau, on remarque une clarification et une atténuation progressive de la couleur;

- Elle contient également des matières en suspension (410mg/l), le résidu sec (1629mg/l) ainsi que la conductivité (5540  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) sont très supérieurs à la norme, en raison d'une forte minéralisation, en particulier en éléments dissous dans l'eau brute.
  - La température (20.5°C) et le pH (7,54) répondent aux limites fixées par les normes de l'OMS, qui reflètent les valeurs saisonnières (printemps).
  - Au contraire, l'indice de saturation de Langelier (LSI=0.07) est positif, ce qui montre que l'eau brute est entartrante (incrustante).
  - La valeur du titre alcalimétrique complet TAC (35,5°F) est importante, tandis que le titre TA des alcalis forts est nul. Ce qui montre que l'eau brute est plus concentrée en hydrogénocarbonates mais pauvre en carbonates et en hydroxydes. Ce qui signifie que l'eau du puits de forage est moyennement bicarbonatée
  - Le TH (85°F) et le TH<sub>Ca</sub>(59°F) enregistrés dépassent largement les normes fixées par l'OMS. Ainsi nous pouvons dire que l'eau du puits de forage d'Ibourassen est très dure, due à la présence de fortes concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , qui représentent beaucoup plus la dureté temporaire.
  - La teneur en chlorures (638,1mg/L) dépasse largement la norme OMS. Ce qui peut affecter la saveur de l'eau et corroder les canalisations de la station de CEVITAL.
  - La concentration en silice (19.48mg/l) est très supérieure à la norme. La silice influe sur le pouvoir entartrant et corrosif de l'eau brute, en renforçant ces derniers.
  - La concentration en nitrates est très inférieure à la norme, ce qui montre que cette eau n'est pas infiltrée par les engrais chimiques. Par contre, celle du plomb est très supérieure à la concentration maximale autorisée par l'OMS. Ce qui signifie que l'eau brute du puits de forage pourrait être nocive pour la santé humaine.
- Les résultats obtenus des différents tests microbiologiques sont consignés dans le tableau (IV.2) suivant :

Tableau(IV.2) : Les résultats obtenus des différents tests microbiologiques

Test bactériologique	Eau avant le traitement	Eau après le traitement
<b>Enterobacter aerogenes</b> <b>E. coli</b> (EMB à 37°C)		
<b>Coliformes totaux</b> (DLC à 37°C) Norme OMS (10 colonies/ml) <b>E. coli</b> (DLC à 44°C) Norme OMS (0 colonies/ml)		
<b>Levures et moisissures</b> OGA à 25 °C		
<b>Germes aérobies mésophiles</b> (PCA à 30 et à 37°C) Norme selon le MSDA (manuel suisse des denrées alimentaires) <300 colonies/ml		
<b>Coliformes totaux</b> (BCPL à 30 °C) (Eau peptonée à 44°C)		

L'eau quelle que soit son origine n'est jamais stérile ; elle contient naturellement une flore bactérienne plus ou moins variée et abondante qui la spécifie. Contrairement aux microorganismes pathogènes ou indicateurs qui peuvent venir la contaminer dans les nappes souterraines ou dans les réseaux.

Pour déterminer la potabilité d'une eau, trois micro-organismes indicateurs de pollutions sont recherchés : Coliformes totaux, Les streptocoques fécaux, et Les coliformes fécaux

Le principe générale des techniques des analyses bactériologiques des eaux consiste àensemencer une quantité connue d'eau à analyser sur un milieu de culture adapté, solide ou liquide durant l'incubation, chaque microorganisme présent se développe pour donner soit une colonie visible sur un milieu solide, soit des changements d'apparence dans un milieu liquide . Dans notre cas , ya pas de changements d'apparence sur les milieux liquides BCPL à 30°C, et l'Eau peptonée à 44°C, en plus l'absence des colonies sur les milieux solides EMB après incubation à 37°C, DLC après incubation à 37 et 44°C, indique l'absence de tous les coliformes totaux et de l'*E. Coli.*. Par contre l'apparition de quelques colonies sur les milieux OGA après incubation à 25°C, et le PCA après incubation à 30 et à 37°C indiquent la présence de quelque microorganismes, de type germes aérobies mésophiles, levures et moisissures (24 colonies) ne dépassant pas la norme qui est >300 colonies/ml.

Le test microbiologique relatif aux coliformes totaux et fécaux sont négatifs, de plus on remarque l'absence d'*E. Coli* ; d'où l'eau d'Ibourassen est relativement potable du point de vue microbiologique.

On conclue que La surveillance de la qualité de l'eau est une activité fondamentale de prévention des risques, elle est d'un intérêt primordial et stratégique pour la prévention de l'état de santé de la population.

**-Deuxième partie-**

**IV.2 Modélisation et optimisation par plan d'expérience**

Après avoir étudié l'influence des facteurs à savoir : la masse initiale de chitosane (m), le potentiel hydrogène (pH) et le temps (t), sur les rendements de la floculation coagulation des eaux du puits de forage, en cherchant à optimiser les paramètres du procédé, par la méthodologie des plans d'expériences en utilisant un plan factoriel à deux niveaux.

Ce plan factoriel a été construit pour évaluer les effets des 3 facteurs ainsi que les éventuelles interactions pouvant exister entre eux.

**IV.2.1. Influence des conditions opératoires sur l'étude de la floculation coagulation des eaux**

**a. Temps de coagulation-floculation**

Le temps de coagulation-floculation est un paramètre qui dépend aussi de la vitesse d'agitation. Il faut une durée suffisamment importante pour que toutes les particules se rencontrent et puisse s'agglomérer. Néanmoins, leurs dimensions doivent être juste suffisantes, pour éviter le phénomène inverse, et la remise en suspension de ces particules. Il est possible de s'attendre à une assez forte interaction entre le temps et la vitesse de floculation à effet négatifs. Il y a en effet antagonisme entre les deux facteurs : plus le temps est long et plus la vitesse est courte, plus il y a possibilité de remettre en suspension les colloïdes et donc moins l'abattement de turbidité sera important.

**b. Potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH est l'un des paramètres les plus influents dans le procédé de coagulation, et de même pour la floculation.

L'influence du pH sur le type de coagulation qu'aura lieu, dépend de la nature des colloïdes correspondant à différents points de Charge Zéro (PZC) et pouvant être chargés négativement ou positivement selon le pH du milieu.

Dans notre cas, la coagulation est faite avec du chitosane, qui est un polyélectrolyte souvent chargé positivement par protonation dans l'eau. Il jouerait les deux rôles dans le procédé de traitement, en tant que coagulant et floculant.

Il est donc très difficile de déterminer la valeur optimale de pH pour les procédés des coagulations et floculation, sachant qu'ils comprennent différents phénomènes dans différentes gammes de pH. Le mieux à faire serait de trouver un compromis entre pH de coagulation (acide) et pH de floculation (basique) dans un domaine de pH=4-9.

### c. Masse du chitosane

Bien que la dose de coagulant soit le paramètre avec un effet positif sur l'efficacité de la coagulation-floculation, il est aussi le principal responsable pour la présence des paramètres physicochimiques dans l'eau traitée. De cette manière, trouver une limite de concentration peut éviter la saturation de l'eau en chitosane et la formation de boue.

Ces modèles nous permettent d'attendre un effet prépondérant de la dose du coagulant-floculant, du pH et du temps d'agitation.

Afin d'exploiter un modèle représentatif et d'en tirer des scénarii d'optimisation du procédé, l'idée a été de créer ce modèle et notamment par le biais d'expérimentations faites au laboratoire.

## IV.2.2. Les résultats des paramètres physicochimiques après le traitement

### a. Résultats de contrôle du pH après le traitement

Dans le tableau IV.3, nous avons consigné les valeurs du pH et représentées par l'histogramme de la figure IV.1, à chaque fin d'essai pour les 8 expériences du plan factoriel.

**Tableau IV.3** : pH de l'eau brute après le traitement

N <sup>0</sup> d'essai	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
pH	8.10	8	7.04	6.82	8.20	8.28	7.58	7.05	7.54	6.5-8.5

### -Discussion

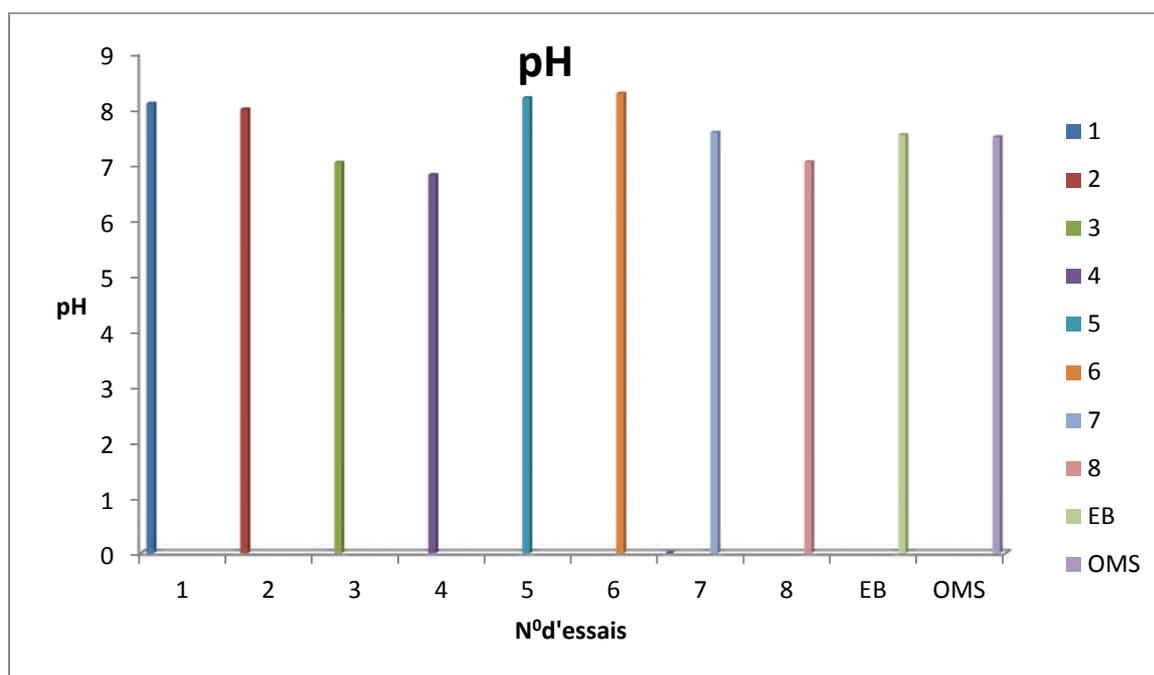
D'après les valeurs du tableau IV.3, on conclut que le pH des essais 3, 7 et 8 sont neutres et proches de la valeur du pH initial de l'eau brute. Elles dépendent de l'ajout de la quantité

d'acide au départ (pH= 4) et du temps d'agitation. Si on prolonge le temps à 60 mn, le pH augmente légèrement et atteint la valeur d'équilibre (7,58).

La valeur la plus faible (6,82) est obtenue dans l'essai 4, correspondant à une masse de chitosane maximale (300mg), tandis que pour les deux autres paramètres, le pH initial ainsi que le temps d'agitation sont minimales. Ce qui montre que la masse de chitosane influe indirectement sur le pH, en équilibrant celui-ci par neutralisation de l'excès d'acide ajouté initialement, lorsque le temps augmente à 60 mn.

Contrairement, aux essais 1, 2, 5 et 6, qui révèlent des pH basiques supérieurs ou égal à 8, en raison de l'ajout d'un excès de base initialement (pH=9).

Néanmoins, toutes les valeurs du pH sont comprises dans le domaine des limites de la norme de l'OMS. Ce qui montre que le traitement de coagulation-floculation avec le chitosane et dans les conditions opératoires choisies, ne compromet pas ce procédé et ne nuit pas à l'environnement.



**Figure IV.1** : Histogramme montrant les variations du pH des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.

#### **b. Résultats de contrôle de conductivité après le traitement**

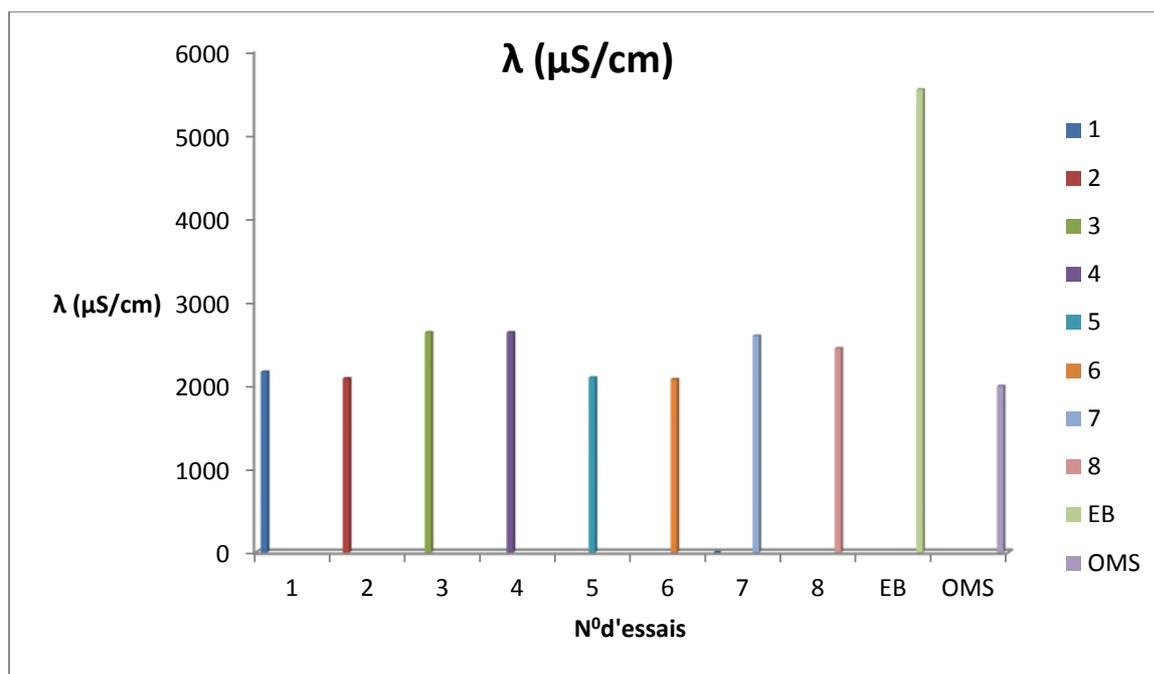
Tableau IV.4 et la figure IV.2, présentent les résultats de la conductivité après traitement de l'eau brute.

**Tableau IV.4 :** La conductivité de l'eau brute après le traitement

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
$\lambda$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	2170	2090	2640	2640	2100	2080	2600	2450	5540	2000

**-Discussion**

Une remarque générale se dégage des valeurs de conductivité mesurée, qui sont toutes supérieures à la norme de l'OMS, en particulier pour la valeur initiale de l'eau brute qui est très élevée (5540  $\mu\text{S/cm}$ ). Néanmoins, la conductivité diminue nettement après le traitement, et les valeurs sont moins élevées pour les essais 1, 2, 5 et 6 correspondant à un pH initial =9 (basique), tandis que les valeurs sont plus importantes et proches pour les essais 3, 4, 7 et 8 réalisés avec un pH initial = 9 (basique). Cela est dû à la conductivité ionique des ions  $\text{H}^+$  qui est relativement plus élevée que celle des ions  $\text{OH}^-$ .

**Figure IV.2 :** Histogramme montrant les variations de la conductivité des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.**c. Résultats de contrôle de température après le traitement**

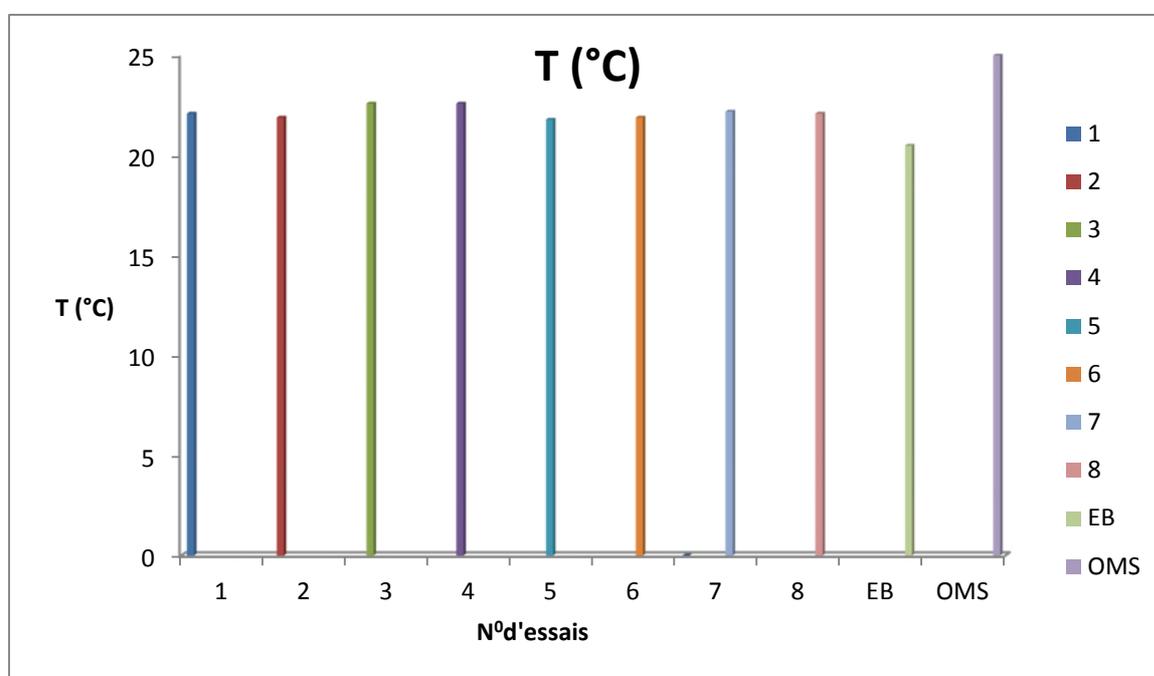
Le tableau IV.5 et la figure IV.3, présentent les résultats de la température après traitement de l'eau brute.

**Tableau IV.5** : La température de l'eau brute après le traitement

N <sup>o</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
T (°C)	22.1	21.9	22.6	22.6	21.8	21.9	22.2	22.1	20.5	25

**-Discussion**

Les valeurs de la température pour tous les essais sont proches entre elles et légèrement au-dessus de celle de l'eau brute, correspondant à la température saisonnière de la période (printemps) du prélèvement ainsi que du traitement. Néanmoins, celles-ci sont inférieures à la norme OMS.



**Figure IV.3** : Histogramme montrant les variations de la température des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.

**d. Résultats de contrôle de l'alcalinité après le traitement**

Le tableau IV.6 présente les résultats du TA après traitement de l'eau brute.

**Tableau IV.6** : TA de l'eau brute après le traitement

N <sup>o</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
TA(°F)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**-Discussion**

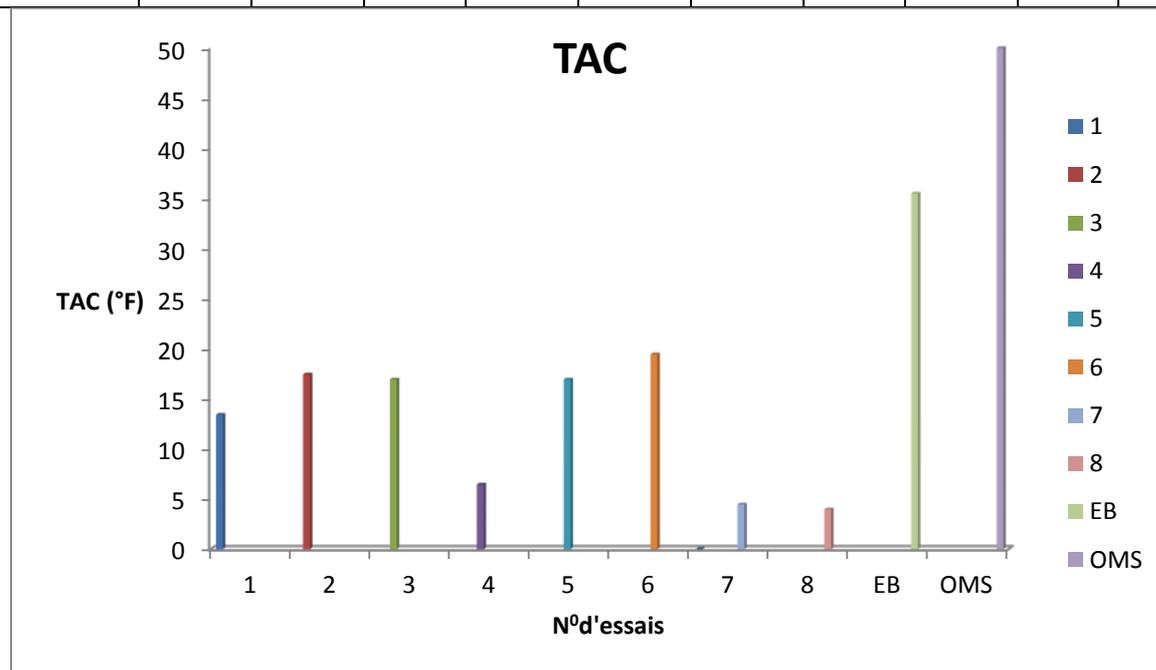
Nous remarquons que le TA ( nul) de l'eau brute est le même après le traitement, malgré l'ajout d'une base dans quelques essais (1, 2, 5, 6). Ceci est probablement dû à la présence du chitosane, qui réagit comme un acide en neutralisant l'excès de base forte au cours de la coagulation-floculation.

**e. Résultats de contrôle de TAC après le traitement**

Le tableau IV.7 et la figure IV.4, présentent les résultats du TAC après traitement de l'eau brute.

**Tableau IV.7 : TAC de l'eau brute après le traitement**

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
TAC (°F)	13.5	17.5	17	6.5	17	19.5	4.5	4	35.5	50



**Figure IV.4 : Histogramme montrant les variations du TAC des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute**

**-Discussion**

D'après les résultats du TAC après traitement, on remarque que toutes les valeurs sont inférieures à celle de l'eau brute initialement et à la norme de l'OMS. Ceci est expliqué par

l'ajout du chitosane qui neutralise l'excès de l'alcalinité dans le milieu en équilibrant l'eau. Le TAC diminue pour les essais avec pH=4 (essais 4, 7, 8) et augmente pour le pH=9 (essais 1, 2, 5, 6) ainsi que pour la masse maximale de chitosane (essai 3).

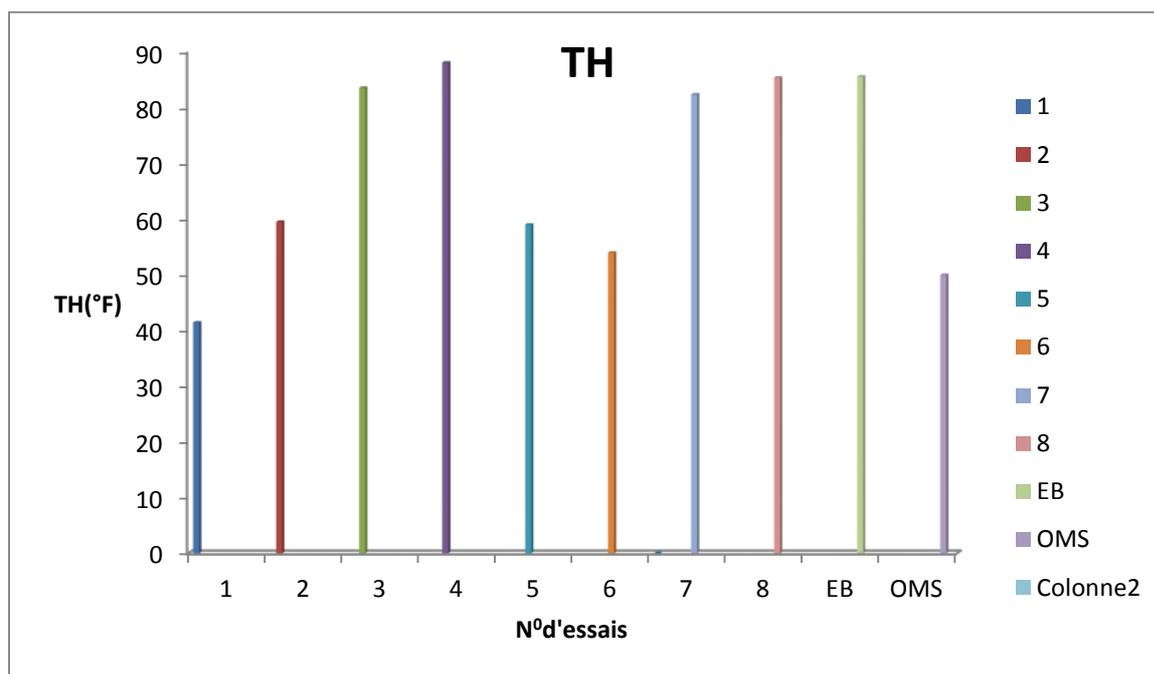
Ceci est du soit à l'ajout de l'acide qui neutralise l'alcalinité de l'eau brute pour les premiers cas, soit à l'ajout de la base qui accentue au contraire l'alcalinité pour les seconds cas d'essais.

#### f. Résultats de contrôle de TH après le traitement

Le tableau IV.8 et la figure IV.5, présentent les résultats du TH après traitement de l'eau brute.

**Tableau IV.8** : TH de l'eau brute après le traitement

N <sup>o</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
TH(°F)	41.5	59.5	83.5	88	59	54	82.3	85.3	85.5	50



**Figure IV.5** : Histogramme montrant les variations du TH des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute

#### -Discussion

Nous remarquons que les valeurs du TH dépendent essentiellement du pH du milieu et dépassent la norme de l'OMS, sauf pour l'essai 1.

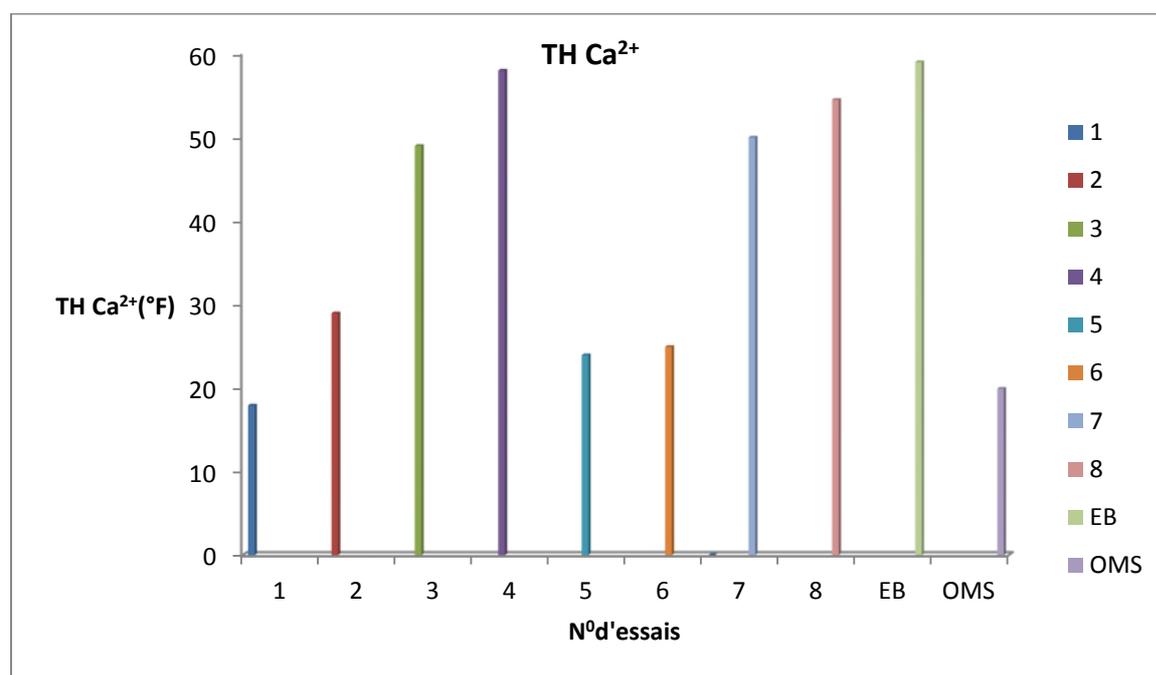
Les valeurs les plus élevées ont été obtenues au pH minimal égal à 4 (acide) pour les essais (3, 4, 7 et 8), par contre les valeurs sont moins importantes au pH maximal égal à 9 (basique) pour les essais (1, 2, 5, 6). En particulier, le TH le plus élevé (88 °F) a été atteint pour l'essai 4, tandis que le TH le moins élevé (41,5 °F) a été réalisé pour l'essai 1. On note également, une légère influence du temps d'agitation, qui fait diminuer le TH pour la valeur maximale du temps (60 mn).

#### g. Résultats de contrôle de $\text{THCa}^{2+}$ après le traitement

Le tableau IV.9 et la figure IV.6, présentent les résultats du  $\text{THCa}^{2+}$  après traitement de l'eau brute.

**Tableau IV.9 :** TH  $\text{Ca}^{2+}$  de l'eau brute après le traitement

N <sup>0</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
TH $\text{Ca}^{2+}$ (°F)	18	29	49	58	24	25	50	50	59	20



**Figure IV.6 :** Histogramme montrant les variations du  $\text{THCa}^{2+}$  des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute

#### -Discussion

Comme pour le TH, les valeurs de  $\text{THCa}^{2+}$  sont supérieures à la norme, sauf dans le cas de l'essai 1 (18 °F), mais elles sont inférieures à celle de l'eau brute (59 °F). On peut dire que les

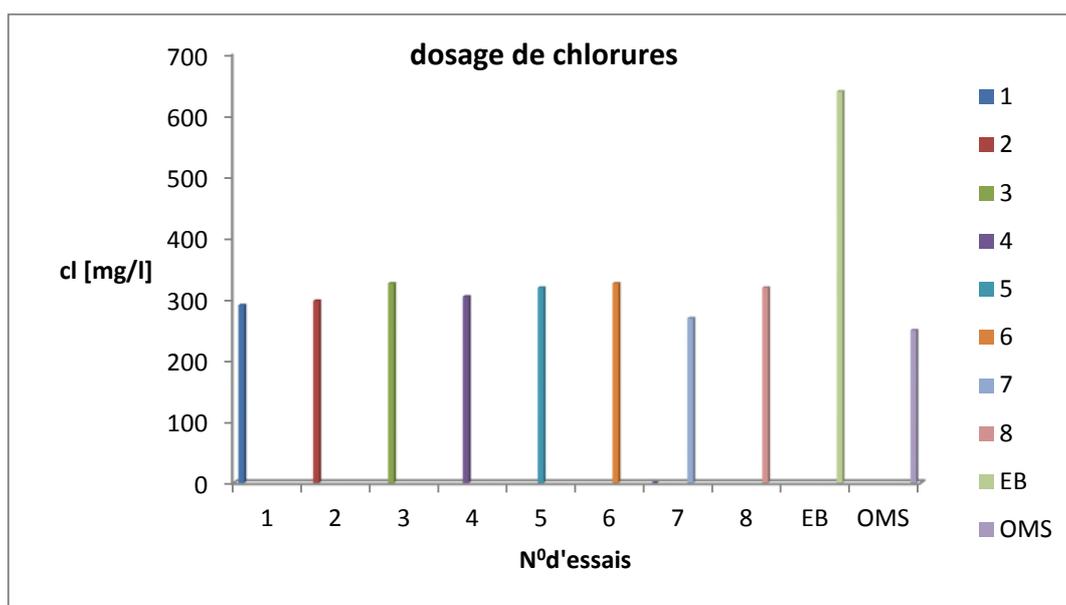
conditions :  $m_{\text{chit}}=300\text{mg}$  (max) ;  $\text{pH}= 9$  (max) ;  $t= 60$  mn (max) sont optimales pour ce paramètre.

#### h. Résultats de contrôle de chlorures après le traitement

Le tableau IV.10 et la figure IV.7, présentent les résultats des Chlorures après traitement de l'eau brute.

**Tableau IV.10:** les chlorures  $\text{Cl}^-$  de l'eau brute après le traitement

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
$\text{Cl}^-$ (mg/l)	290.7	297.8	326.2	304.9	319.1	326.2	269.4	319.1	638.1	250



**Figure IV. 7 :** Histogramme montrant les variations de  $\text{Cl}^-$  des essais du plan factoriel Pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute

#### -Discussion

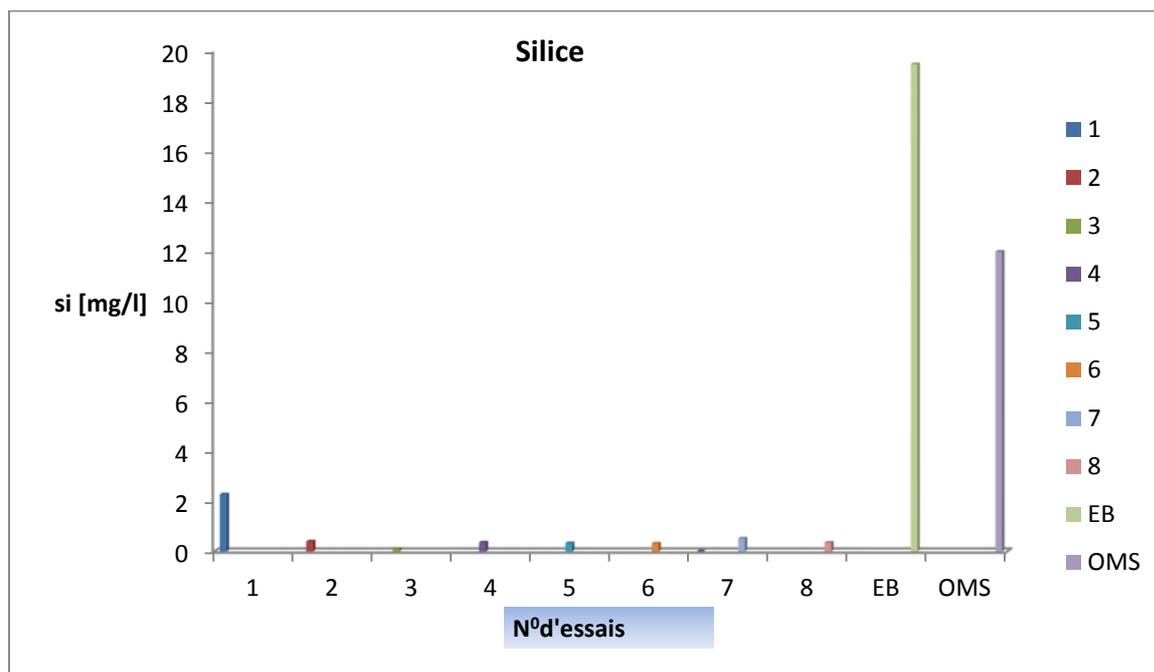
Les concentrations en  $\text{Cl}^-$  sont toutes supérieures à la norme, mais inférieures à celle de l'eau brute avant traitement. La valeur minimale (269.4 mg/L) a été réalisée pour l'essai 7 ( $m_{\text{chit}}=50\text{mg}$  ;  $\text{pH}=4$  ;  $t=60$  mn). Les variations sont aléatoires, on peut dire que ce paramètre n'est pas influencé sensiblement par les conditions opératoires des essais.

### i. Résultats de contrôle de la silice après le traitement

Le tableau IV.11 et la figure IV.8, présentent les résultats de la silice après traitement de l'eau brute.

**Tableau IV.11** : la silice de l'eau brute après le traitement

N <sup>0</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	EB	OMS
[SiO <sub>2</sub> ] (mg/l)	2.30	0.4	0.1	0.36	0.33	0.32	0.52	0.35	19.48	12



**Figure IV.8** : Histogramme montrant les variations de la silice des essais du plan factoriel pour le traitement de coagulation-floculation de l'eau brute.

### -Discussion

La concentration en silice de l'eau brute (19,48 mg/L) est nettement supérieure à la norme (12mg/L), et à celle de l'eau après traitement pour tous les essais. La valeur minimale (0,1mg/) a été réalisée pour l'essai 3 ( $m_{\text{chit}} = 300\text{mg}$  ;  $\text{pH}=4$  ;  $t=60\text{mn}$ ) tandis que la valeur maximale (2,30 mg/) a été atteinte pour l'essai 1 ( $m_{\text{chit}} = 300\text{mg}$  ;  $\text{pH}=9$  ;  $t=60\text{mn}$ ). Ce qui signifie que la teneur en silice dépend principalement de la masse de chitosane.

**IV.2.3. Optimisation des facteurs influants et modélisation du rendement d'enlèvement**

Les niveaux des facteurs et leurs correspondances en variables centrées réduites ainsi que l'ensemble des expériences réalisées, sont données respectivement dans les tableaux (IV-12) et (IV-13). Les paramètres suivants gardent une valeur fixe tout le long des essais: la vitesse d'agitation ( $\omega = 45\text{tr/min}$ ), la chaux ( $\text{Ca(OH)}_2$  (6ml) ; et la température ( $T=20^\circ\text{C}$ ).

**Tableau IV-12** : domaine des valeurs des facteurs à deux niveaux

Variables réelles	Variables centrées réduites	Niveau bas	Niveau haut
		-1	+1
Temps (min)	$X_1$	15	60
pH	$X_2$	4	9
$m_{\text{chit}}$ (mg)	$X_3$	50	300

- -1 et +1 : Sont respectivement, les niveaux bas et haut du plan factoriel ;

La réponse  $y$  à modéliser est le taux d'élimination les paramètres physicochimiques ; calculés comme suit (pour la dureté totale par exemple) :

$$y(\%) = \frac{TH_i - TH_f}{TH_i} * 100$$

Avec :

$TH_i$  : la dureté totale de l'eau brute ;

$TH_f$  : la dureté totale de l'eau traitée.

Les variables centrées réduites  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  sont déterminées par l'application de formule de passage (II-2).

**IV.2.2 Elaboration du modèle de deuxième degré**

Le modèle mathématique postulé s'écrit dans ce cas sous la forme suivante :

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3$$

Pour élaborer le modèle de second degré, on réalise les essais du plan factoriel complet à deux niveaux ( $2^{k=3}$ ). Les matrices d'expériences du plan du second degré sont représentées dans les tableaux ci-dessous.

**a. Le rendement de la conductivité  $\lambda$  ( $\mu\text{S/cm}$ ).****Tableau IV.13** : Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ )

N <sup>0</sup>	Variables codées				y(%)	$\hat{y}$ (%)	ei(%)
	X0	X1	X2	X3			
1	1	1	1	1	60,83	61,3037	-0,47375
2	1	1	1	-1	62,27	61,7963	0,47375
3	1	1	-1	1	52,84	52,3663	0,47375
4	1	1	-1	-1	52,84	53,3137	-0,47375
5	1	-1	1	1	62,09	61,6162	0,47375
6	1	-1	1	-1	62,45	62,9237	-0,47375
7	1	-1	-1	1	53,06	53,5337	-0,47375
8	1	-1	-1	-1	55,77	55,2962	0,47375

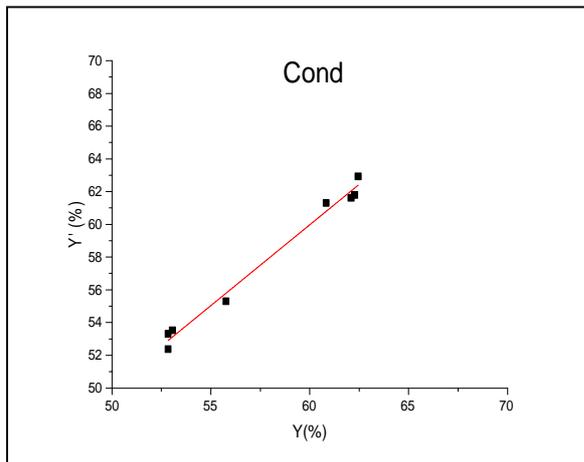
L'équation du modèle prédit est :

$$\text{Cond} = 57,769 + 0,564 X_1 - 4,141 X_2 + 0,574 X_3 + 0,114 X_1 * X_2 + 0,204 X_1 * X_3 + 0,214 X_2 * X_3$$

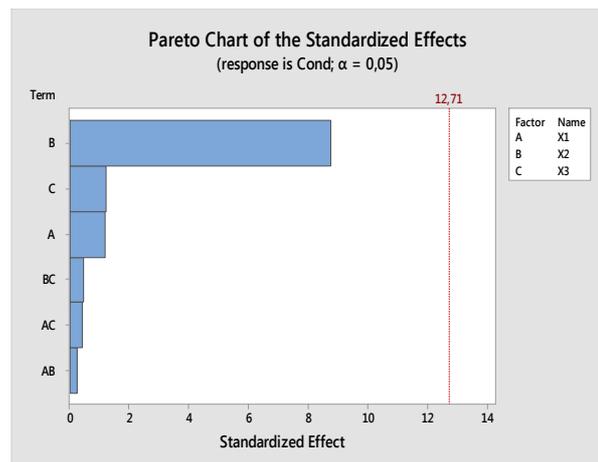
**Tableau IV.14** : Résultats statistiques de l'optimisation du rendement du paramètre de conductivité par le plan factoriel

Termes	Coefficients	t-value (>4,303 ; DDL=2)	F-value	p-value
X0	57,769	121,94		0,005
X1	0,564	1,19	1,42	0,445
X2	-4,141	-8,74	76,41	0,073
X3	0,574	1,21	1,47	0,439
X1*X2	0,114	0,24	0,06	0,850
X1*X3	0,204	0,43	0,18	0,741

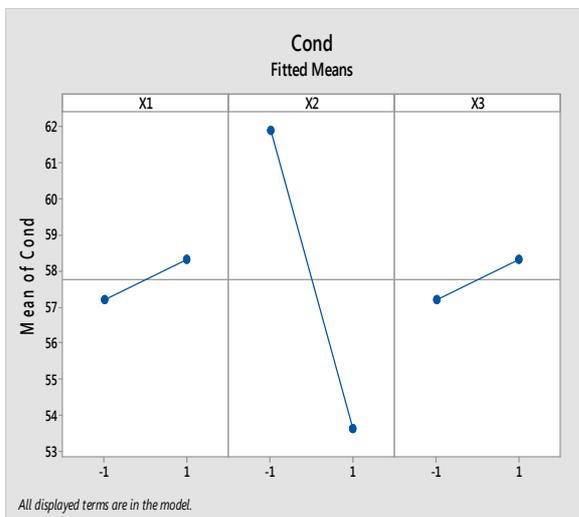
<b>X2*X3</b>	0,214	0,45	0,20	0,730
<b>L'équation du modèle linéarisé est :</b> $\hat{Y} = 0,98761Y + 0,71547$ $R^2 = 98,76\%$		$ t_{exp}  = 21,87 (> t_{th} = 2,365)$ (DDL=7, $\alpha=0,05$ ) <b>F= 478,7 &gt; 1</b>		



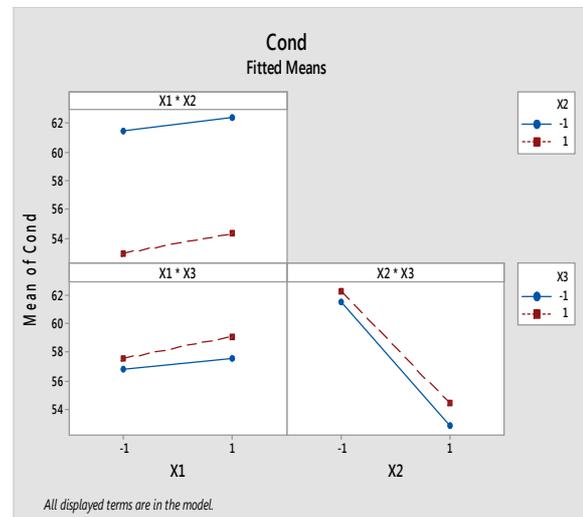
-Droite de regression linéaire du modèle-



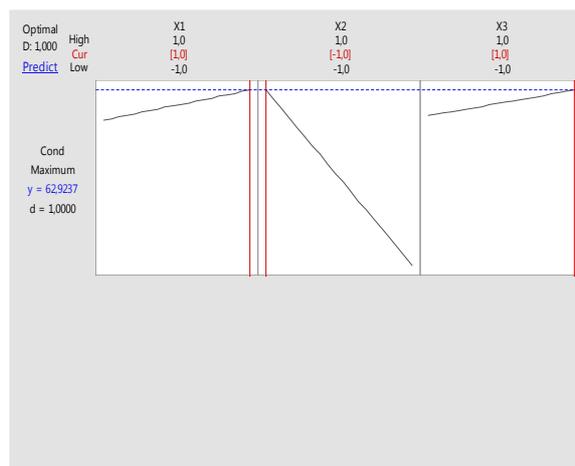
-Diagramme Paréto des effets des termes-



-Diagramme des effets par facteurs-



- Diagramme des effets des interactions-



**-Diagramme de la réponse prédite optimisée-**

**Figure IV.9:** courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement de la conductivité par le plan factoriel à 3 facteurs.

Le rendement optimisé par le modèle est :  $R_{\text{cond}} (\%) = 62,92\%$  est prédit pour les valeurs des facteurs suivantes :

X1 → +1

X2 → -1

X3 → +1

L'examen du diagramme des réponses estimées en fonction des réponses mesurées (**figure IV.9**) montre un bon coefficient de détermination  $R^2 = 0,9876$ , cela signifie qu'il y a une bonne corrélation entre les réponses prédites par le modèle du plan d'expérience et les valeurs expérimentales du process. Nous remarquons aussi (diagramme des effets), que les facteurs temps (X1) et  $m_{\text{chit}}$  (X3) font augmenter légèrement les rendements, tandis que le facteur pH (X2) influence beaucoup plus les résultats en faisant diminuer les rendements pour la conductivité, en passant de la valeur minimale à la valeur maximale du facteur considéré.

### **b. Le rendement du TH**

Les valeurs sont consignées dans le tableau IV.15 et représentées par la figure IV.10.

**Tableau IV.15:** Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ )

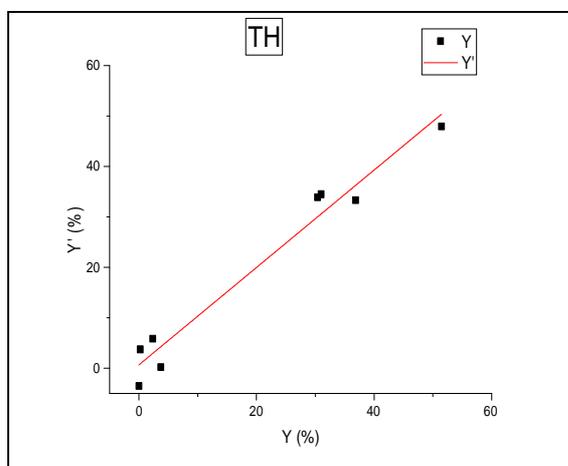
Variables codées							
N <sup>0</sup>	X0	X1	X2	X3	y(%)	ŷ (%)	ei(%)
1	1	1	1	1	51,46	47,95	3,51
2	1	1	1	-1	30,40	33,91	-3,51
3	1	1	-1	1	2,34	5,85	-3,51
4	1	1	-1	-1	0	-3,51	3,51
5	1	-1	1	1	30,99	34,50	-3,51
6	1	-1	1	-1	36,84	33,33	3,51
7	1	-1	-1	1	3,74	0,23	3,51
8	1	-1	-1	-1	0,23	3,74	-3,51

Equation de Régression linéaire du modèle:

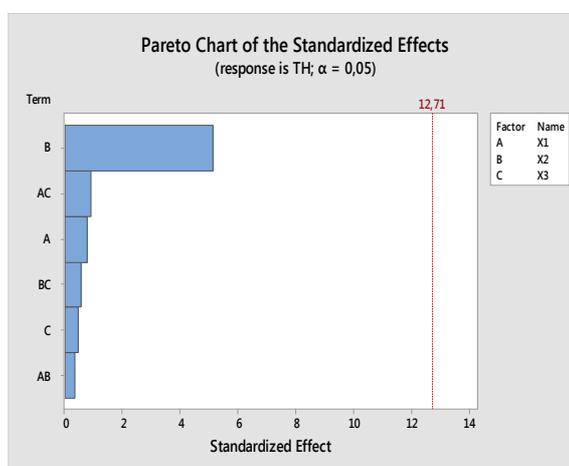
$$TH = 19,50 - 2,63 X1 - 17,92 X2 - 1,55 X3 + 1,17X1*X2 + 3,22 X1*X3 + 1,96X2*X3$$

Tableau IV. 16 : Résultats statistiques de l'optimisation du rendement de TH par plan factoriel à 2 niveaux.

Termes	Coefficients	t-value (> t <sub>th</sub> = 4,303 ; DDL=2 ; α=0,05)	F-value	p-value
X0	19,5000	5,56		0,113
X1	-2,6325	-0,75	0,56	0,590
X2	-17,9225	-5,11	26,07	0,123
X3	-1,5500	-0,44	0,20	0,735
X1*X2	1,1700	0,33	0,11	0,795
X1*X3	3,2175	0,92	0,84	0,528
X2*X3	1,9575	0,56	0,31	0,676
L'équation du modèle linéarisé est : Ŷ = 0,96563Y + 0,67028 R <sup>2</sup> = 96,56%		t <sub>exp</sub>   = 12,98 (> t <sub>th</sub> = 2,365) (DDL=7, α=0,05) <b>F=1,0356 ≈ 1</b>		



-Droite de régression linéaire du modèle-



-Diagramme Paréto des effets des termes-

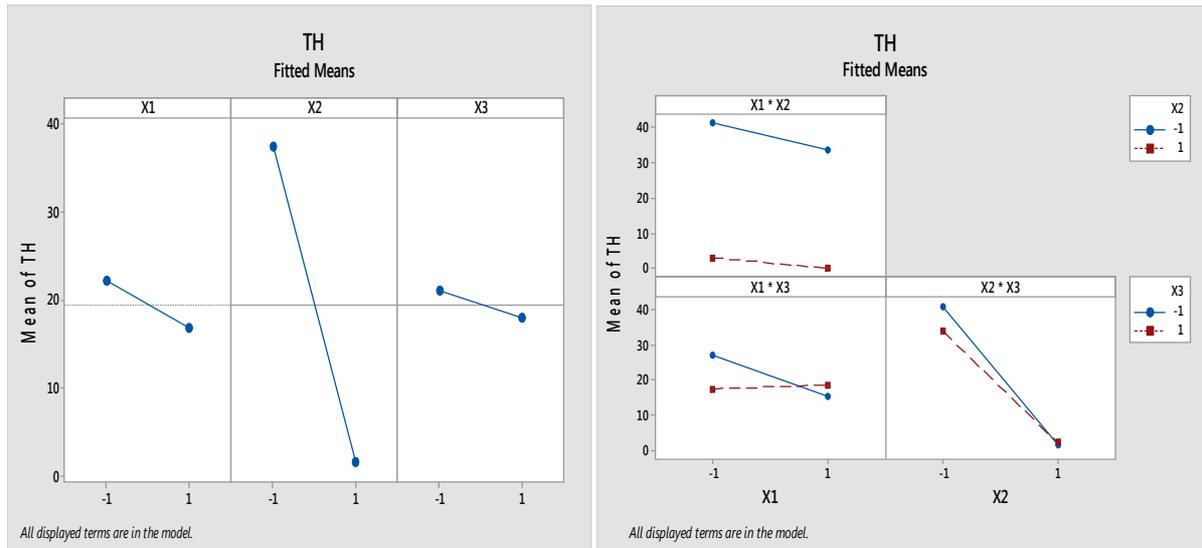
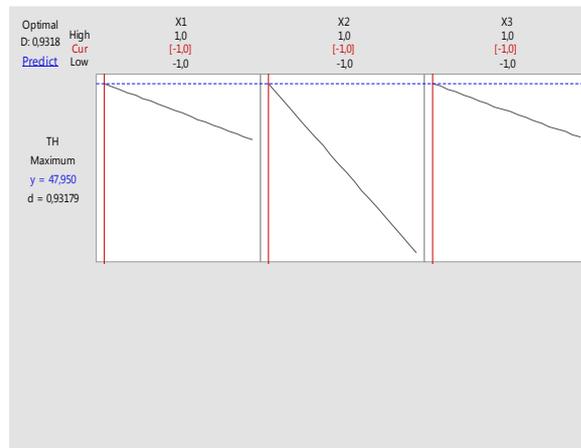


Diagramme des effets par facteurs-

- Diagramme des effets des interactions-



-Diagramme de la réponse prédite optimisée-

**Figure IV.10 :** courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement du TH par le plan factoriel à 3 facteurs

Le rendement optimisé par le modèle est :  $R_{TH} (\%) = 47,95\%$  est prédit pour les valeurs des facteurs suivantes :

- X1 → -1
- X2 → -1
- X3 → -1

L'examen du diagramme des réponses estimées en fonction des réponses mesurées (**figure IV.10**) montre un coefficient de détermination  $R^2 = 0.9656$  inférieur à 0,98, cela signifie que la

corrélation entre les réponses prédites par le modèle du plan d'expérience et les valeurs expérimentales du process n'est pas suffisante pour le paramètre TH.

D'après le diagramme des effets de Paréto, il est fort probable que la dépendance du modèle soit plus importante du facteur pH ( terme B=X2) que des autres termes et facteurs. D'où, il faut réexaminer l'influence des facteurs et reformuler l'équation du modèle, en ignorant soit les deux autres facteurs (temps =A=X, m<sub>chit</sub> = C=X3) et négliger l'influence de certaines interactions (AB et BC). Par ailleurs, on observe le même type d'influence de la part des facteurs sur les rendements du TH, qui font diminuer les valeurs en passant de la valeur minimale à la valeur maximale des 3 facteurs. Sauf cette influence est nettement plus importante pour le facteur pH (X2) (diagramme des effets).

### c. Le rendement de la THCa

Les valeurs sont regroupées dans le tableau IV.17 et représentées par les diagrammes de la figures IV.11.

**Tableau IV.17** : Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ )

N <sup>0</sup>	Variables codées				y(%)	ŷ (%)	ei(%)
	X0	X1	X2	X3			
1	1	1	1	1	69,49	70,65	-1,16
2	1	1	1	-1	50,84	49,68	1,16
3	1	1	-1	1	1,69	0,53	1,16
4	1	1	-1	-1	59,32	60,48	-1,16
5	1	-1	1	1	57,63	56,47	1,16
6	1	-1	1	-1	15,25	16,41	-1,16
7	1	-1	-1	1	7,67	8,83	-1,16
8	1	-1	-1	-1	50,85	49,69	1,16

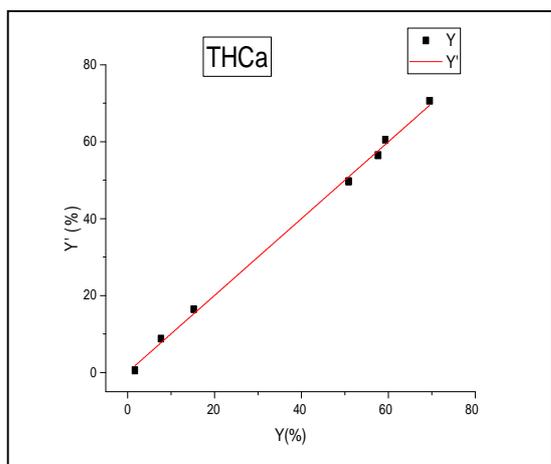
Equation de régression linéaire du modèle est:

$$\text{THCa} = 39,09 + 4,97 X1 - 9,21 X2 - 6,24 X3 + 20,23 X1*X2 - 4,77 X1*X3 + 5,62 X2*X3$$

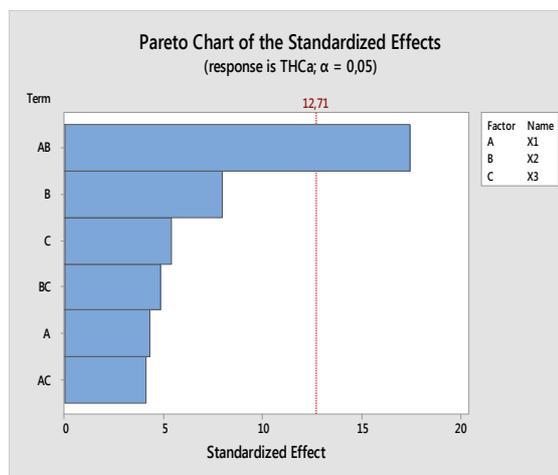
**Tableau IV.18** Résultats statistiques de l'optimisation du rendement du paramètre THCa par le plan factoriel

Termes	Coefficients	t-value (> t <sub>th</sub> =4,303)	F-value	p-value
--------	--------------	---------------------------------------	---------	---------

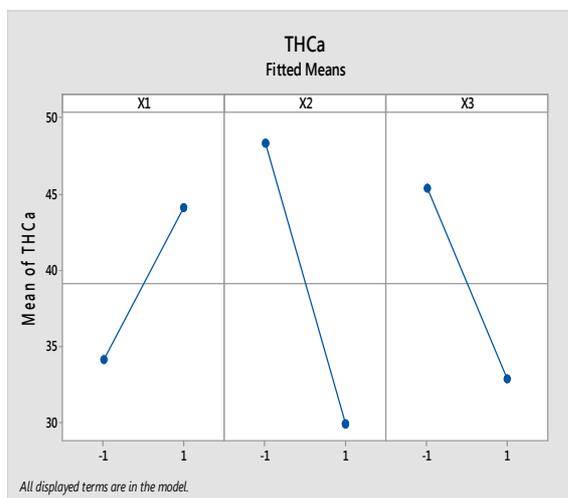
<b>b0</b>	39,09	33,70		0,019
<b>X1</b>	4,97	4,29	18,38	0,146
<b>X2</b>	-9,21	-7,94	63,04	0,080
<b>X3</b>	-6,24	-5,38	28,96	0,117
<b>X1*X2</b>	20,23	17,44	304,14	0,036
<b>X1*X3</b>	-4,77	-4,11	16,93	0,152
<b>X2*X3</b>	5,62	4,84	23,47	0,130
<b>L'équation du modèle linéarisé est:</b>		$ t_{exp}  = 52,24 (> t_{th} = 2,365) (\alpha = 0,05 ; DDL = 7)$		
$\hat{Y} = 0,99781Y + 0,08575$ $R^2 = 99,78\%$		<b>F = 2729,49 &gt; 1</b>		



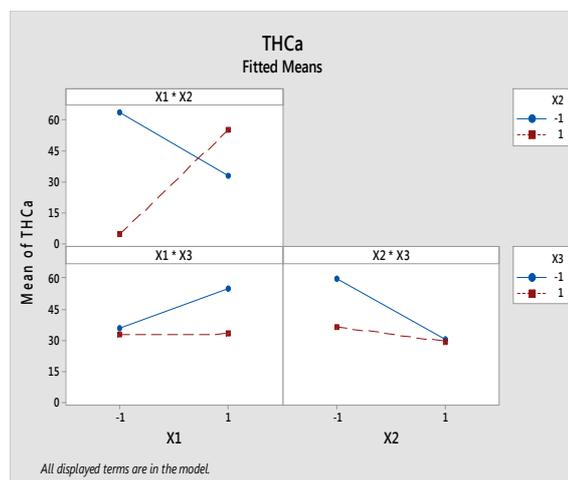
-Droite de régression linéaire du modèle-



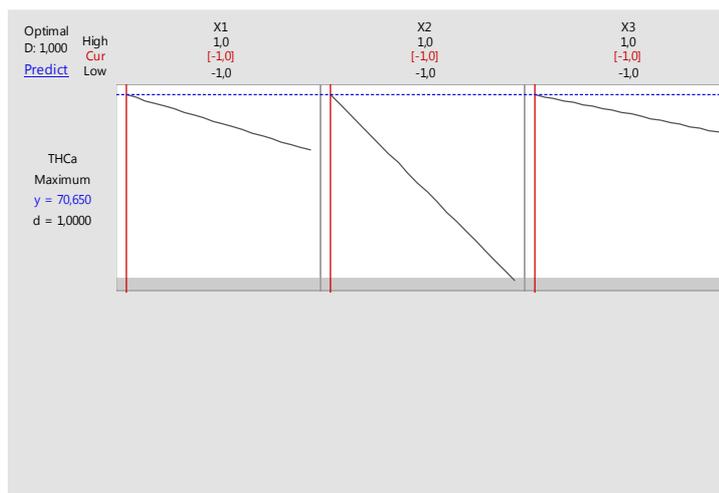
-Diagramme Paréto des effets des termes-



-Diagramme des effets par facteurs-



- Diagramme des effets des interactions-



### -Diagramme de la réponse prédite optimisée-

**Figure IV.11 :** courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement du THC<sub>a</sub> par le plan factoriel à 3 facteurs

Le rendement optimisé par le modèle est :  $R_{\text{THCa}} (\%) = 70,65\%$  est prédit pour les valeurs des facteurs suivantes :

X1 → -1

X2 → -1

X3 → -1

L'examen du diagramme des réponses estimées en fonction des réponses mesurées (**figure IV.11**) montre un bon coefficient de détermination  $R^2 = 0,9978$ , cela signifie qu'il y a une bonne corrélation entre les réponses prédites par le modèle du plan d'expérience et les valeurs expérimentales obtenues dans les essais de coagulation-floculation pour le paramètre THC<sub>a</sub>. Les trois facteurs influencent d'une manière importante sur les résultats, le premier (X1=temps d'agitation) fait augmenter les rendements tandis que les deux autres, X2 (pH) et X3 ( $m_{\text{chit}}$ ) font diminuer ceux-ci (diagramme des effets). Le diagramme de Paréto montre que l'interaction AB (X1X2, temps-pH) présente l'influence la plus importante sur les résultats.

#### **d. Le rendement de Cl<sup>-</sup>**

Les résultats des valeurs expérimentales et des valeurs prédites sont portées dans le tableau IV.19 et ceux du traitement statistique sont représentés par les diagrammes de la figure IV.12.

**Tableau IV.19 :** Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ )

N <sup>0</sup>	Variables codées				y(%)	ŷ (%)	ei(%)
	X0	X1	X2	X3			
1	1	1	1	1	54,44	53,05	1,39
2	1	1	1	-1	53,33	54,72	-,39
3	1	1	-1	1	48,88	50,27	-,39
4	1	1	-1	-1	52,22	50,83	1,39
5	1	-1	1	1	50,00	51,39	-,39
6	1	-1	1	-1	48,88	47,49	1,39
7	1	-1	-1	1	57,78	56,39	1,39
8	1	-1	-1	-1	50,00	51,39	-0,39

L'équation du modèle prédit par le plan est :

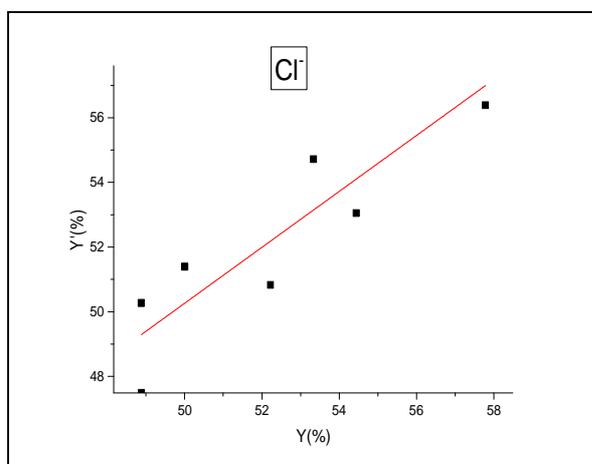
$$CI = 51,94 - 0,83 X1 + 0,28 X2 - 0,28 X3 - 0,28 X1*X2 - 1,39 X1*X3 + 1,95 X2*X3$$

**Tableau IV.20** : résultats du contrôle statistique pour le paramètre CI par le plan factoriel à 2 niveaux

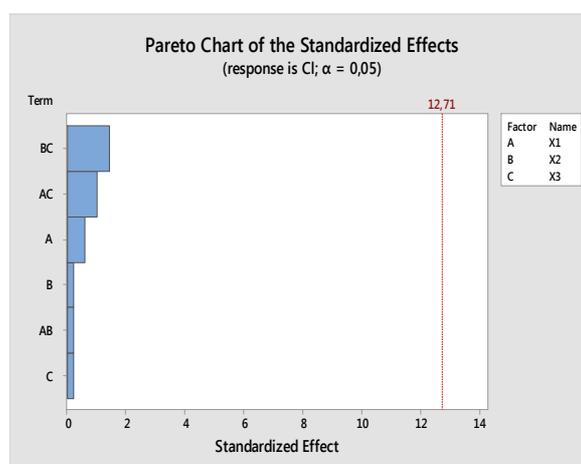
Termes	Coefficients	t-value (> t <sub>th</sub> =4,303)	F-value	p-value (α=0,05)
X0	51,94	37,40		0,017
X1	-0,83	-0,60	0,36	0,656
X2	0,28	0,20	0,04	0,874
X3	-0,28	-0,20	0,04	0,875
X1*X2	-0,28	-0,20	0,04	0,875
X1*X3	-1,39	-1,00	1,00	0,499
X2*X3	1,95	1,40	1,96	0,395

L'équation du modèle linéarisé est:  
 $\hat{Y} = 0,8654Y + 6,99143$   
 $R^2 = 77,52\%$

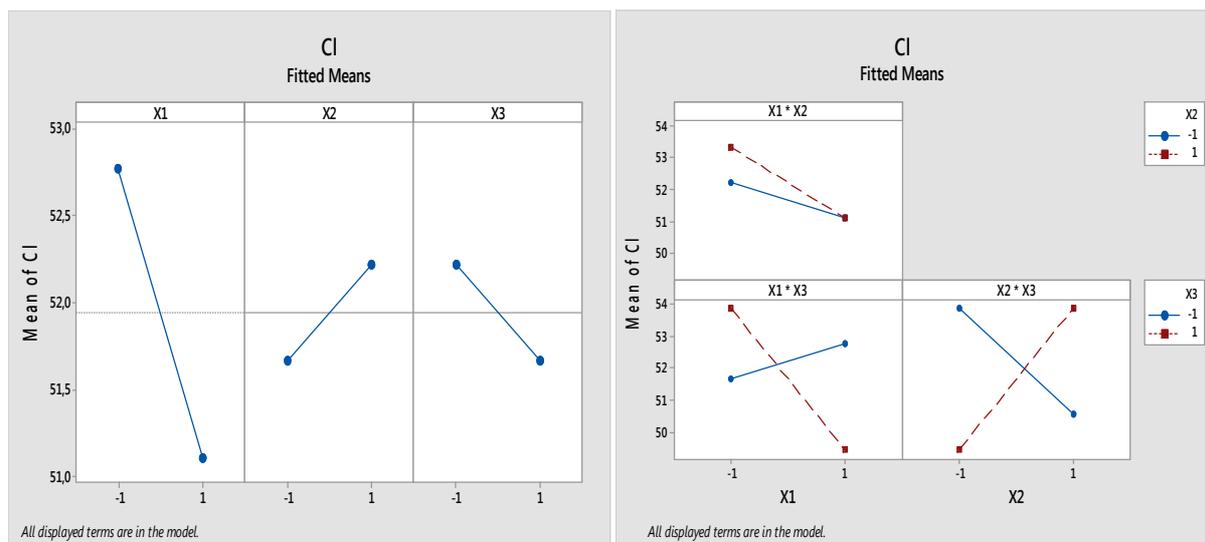
$|t_{exp}| = 0,92 (> t_{th} = 2,365) (\alpha = 0,05 ; DDL = 7)$   
**F = 20,64 > 1**



-Droite de régression linéaire du modèle-

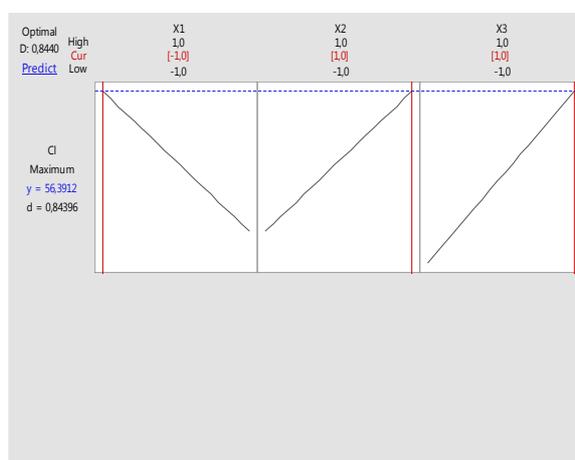


-Diagramme Paréto des effets des termes-



-Diagramme des effets par facteurs-

- Diagramme des effets des interactions-



-Diagramme de la réponse prédite optimisée-

**Figure IV.12:** courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement de CI par le plan factoriel à 3 facteurs

Le rendement optimisé par le modèle est :  $R_{CI} = 56,39\%$  est prédit pour les valeurs des facteurs suivantes :

$X1 \rightarrow -1$

$X2 \rightarrow +1$

$X3 \rightarrow +1$

L'examen du diagramme des réponses estimées en fonction des réponses mesurées (**figure IV.12**) montre un coefficient de détermination  $R^2 = 0.7752$ . Ce qui signifie qu'il n'existe pas une bonne corrélation entre les réponses prédites par le modèle du plan d'expérience et les valeurs expérimentales pour le paramètre chlorures.

D'après le diagramme des effets de Paréto, nous remarquons que les trois termes B ( $X_2$ =pH), AB ( $X_1X_2$ = temps-pH) et C ( $X_3$ = $m_{\text{chit}}$ ) sont de mêmes importances et ont peu d'influence sur les résultats. Ce qui nous suggère de revoir l'équation du modèle, en éliminant ces termes de l'équation. Par ailleurs, les coefficients des variables du modèle sont très faibles devant la valeur de la constante  $X_0$  ( $\beta_0$ ), ce qui montre que les résultats prédits sont peu influencés par les facteurs et leurs interactions.

### e. Le rendement de la silice

Les résultats sont rassemblés dans le tableau IV.21 et les traitements statistiques sont représentés par la figure IV.13.

**Tableau IV.21** : Matrice des essais du plan factoriel complet ( $2^{k=3}$ )

N <sup>0</sup>	Variables codées				y(%)	$\hat{y}$ (%)	ei(%)
	X0	X1	X2	X3			
1	1	1	1	1	88.19	82,18	6,01
2	1	1	1	-1	97.95	103,96	-6,01
3	1	1	-1	1	99.49	105,50	-6,01
4	1	1	-1	-1	98.15	92,14	6,01
5	1	-1	1	1	38.31	44,32	-6,01
6	1	-1	1	-1	98.36	92,35	6,01
7	1	-1	-1	1	97.33	91,32	6,01
8	1	-1	-1	-1	98.2	104,21	-6,01

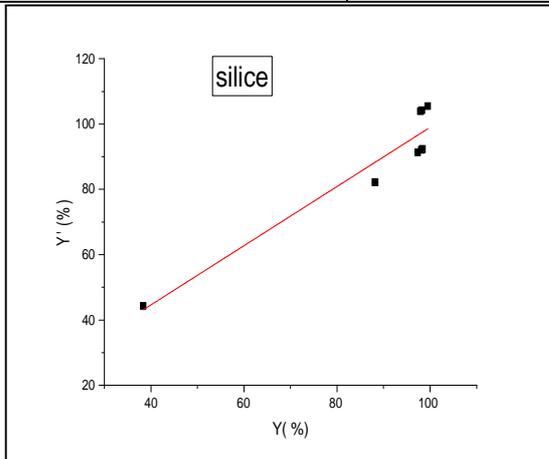
L'équation du modèle prédit par le plan factoriel est :

$$\text{Silice} = 89,50 + 8,67 X_1 + 8,79 X_2 - 6,45 X_3 - 8,78 X_1 * X_2 + 6,56 X_1 * X_3 + 5,92 X_2 * X_3$$

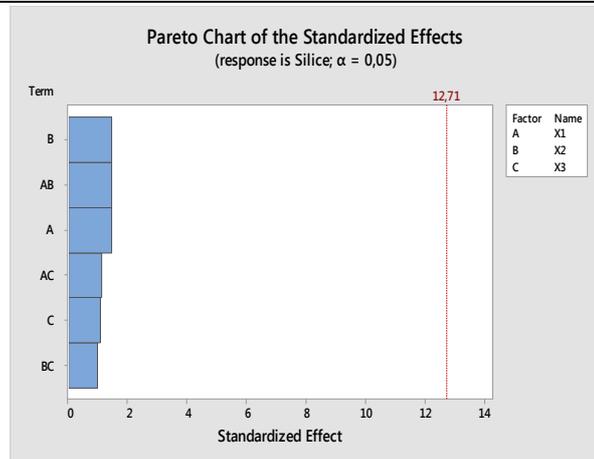
**Tableau IV.22:** résultats du contrôle statistique du rendement de silice par le plan factoriel

Termes	Coefficients	t-value ( $> t_{th}=4,303$ ; DDL= 2 ; $\alpha =0,05$ )	F -value	p-value ( $\alpha=0,05$ )
<b>X0</b>	89,50	14,89		0,043
<b>X1</b>	8,67	1,44	2,08	0,386
<b>X2</b>	8,79	1,46	2,14	0,386
<b>X3</b>	-6,45	-1,07	1,15	0,478
<b>X1*X2</b>	-8,78	-1,46	2,14	0,382

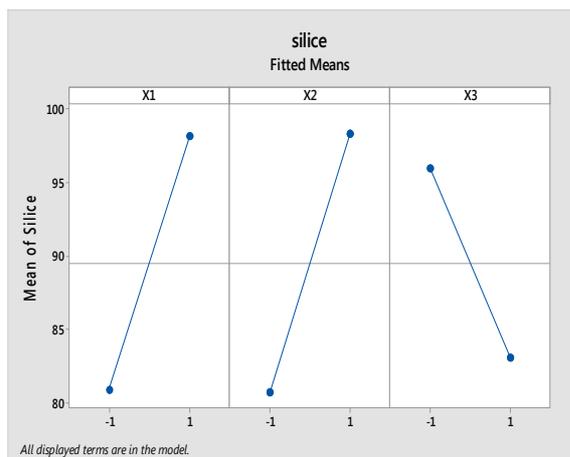
<b>X1*X3</b>	6,56	1,09	1,19	0,472
<b>X2*X3</b>	5,92	0,99	0,97	0,505
<b>L'équation du modèle linéarisé est:</b> $\hat{Y} = 0,90629 Y + 8,38656$ $R^2 = 90,63\%$		$ t_{exp}  = 7,62 (> t_{th} = 2,365) (\alpha = 0,05 ; DDL = 7)$  <b>F = 58,03 &gt; 1</b>		



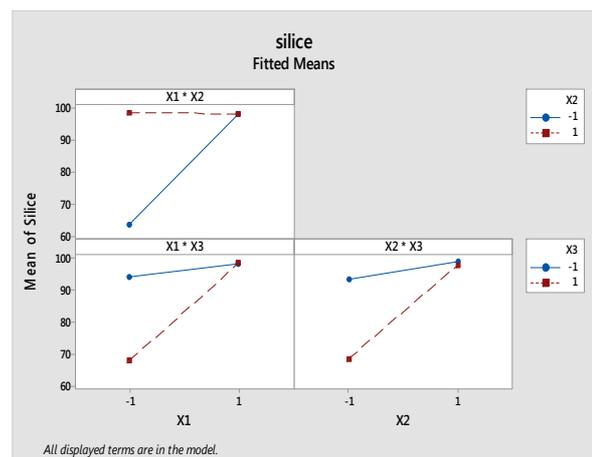
-Droite de régression linéaire du modèle-



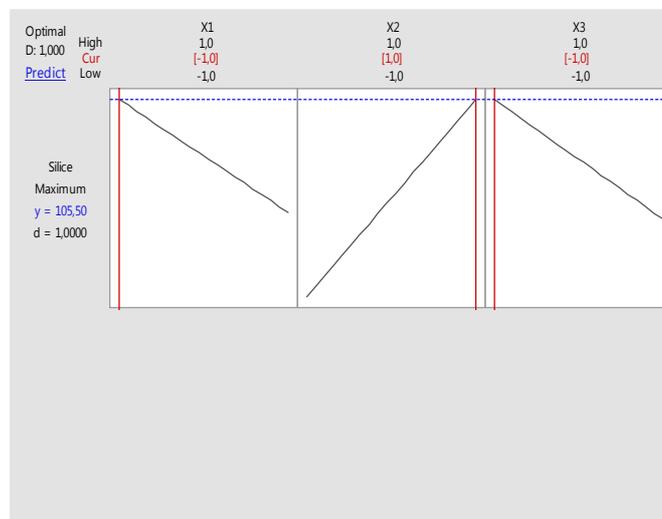
-Diagramme Paréto des effets des termes-



-Diagramme des effets par facteurs-



- Diagramme des effets des interactions-



**-Diagramme de la réponse prédite optimisée-**

**Figure IV.13:** courbe de régression linéaire du modèle et diagrammes de contrôle statistique de l'optimisation du rendement de silice par le plan factoriel à 3 facteurs

Le rendement optimisé par le modèle est :  $R_{Si} = 105,5\%$  est prédit pour les valeurs des facteurs suivantes :

$$X1 \rightarrow -1$$

$$X2 \rightarrow +1$$

$$X3 \rightarrow -1$$

L'examen du diagramme des réponses estimées en fonction des réponses mesurées (**figure IV.13**) montre un coefficient de détermination  $R^2 = 0,9063$  insuffisant, cela signifie qu'il n'existe pas une bonne corrélation entre les réponses prédites par le modèle du plan d'expérience et les valeurs expérimentales pour le paramètre silice.

De plus, le diagramme de Paréto montre des effets pratiquement similaires et de même intensités, en particulier pour les deux facteurs A ( $X1 = \text{temps}$ ), B ( $X2 = \text{pH}$ ) et de l'interaction AB ( $\text{temps-pH}$ ). On peut conclure, que l'équation du modèle dépend d'une manière importante et équitable des 3 facteurs ainsi que de leurs interactions.

Néanmoins, le diagramme des effets montre que les résultats augmentent significativement avec le temps d'agitation et le pH, tandis qu'ils diminuent avec la masse du coagulant-floculant.

## Conclusion Générale

---

Le travail entrepris dans ce mémoire avait principalement deux objectifs, qui sont d'une part l'étude de la qualité physicochimique et microbiologique de l'eau du puits de forage d'Ibourassen, et d'autre suggérer un procédé de traitement par coagulation – floculation optimisé par un plan d'expériences.

Différents paramètres ont été étudiés, le pH, la température, la conductivité, la dureté, l'alcalinité, les chlorures, les nitrates, la silice, le fer et le plomb.

Dans ce travail, il nous est apparu important de commencer par une analyse physico-chimique et bactériologique de l'eau brute avant traitement, pour mieux montrer l'efficacité du traitement qui sera appliqué au cours de notre étude.

A partir des résultats et discussions présentés, nous avons pu conclure que :

- L'analyse bactériologique a révélé que le taux des germes totaux, coliformes totaux et fécaux ainsi que les streptocoques fécaux sont absents ou peu présents dans l'eau brute. D'où celle-ci est conforme aux normes exigées par l'organisation mondiale de la santé (OMS).
- La majorité des paramètres physico-chimiques initiales de l'eau brute dépassent les normes fixées par l'OMS.
- Une bonne corrélation entre les réponses prédites par le modèle du plan d'expérience, et les valeurs expérimentales pour la majorité des paramètres étudiés a été observée avec un coefficient de régression linéaire > 98%.

Sauf pour le TH et les chlorures, qui ne vérifient pas suffisamment l'équation du modèle, qui tient compte de toutes les interactions jusqu'à l'ordre 2. Ce qui exige pour ces deux paramètres, d'opter pour un modèle comportant uniquement les termes qui influent le plus sur les résultats.

Au terme de ce travail, nous pouvons conclure que le traitement par le procédé de coagulation –floculation de l'eau brute d'Ibourassen, optimisé par le plan d'expérience factoriel à 3 facteurs et à deux niveaux, peut prédire les conditions expérimentales optimales, qui sont :

**Temps d'agitation= 60mn ; pH= 9 ; m<sub>chit</sub> = 300mg**

sous la température ambiante, et peut être efficace aussi pour l'élimination des MES, du fer, du plomb et de la réduction de la dureté au seuil minimal. D'où cette eau ainsi traitée, présente une meilleure qualité de potabilité et pourra mieux convenir à son utilisation pour la fabrication de l'eau ultra pure.

## Références bibliographique

---

- [1] : Kirkpatrick k. Fleming E., (2008).La qualité de l'eau, ROSS TECH 07/47, 12p
- [2] : Henri L., (2012). L'eau Potable, Édition réimprimée, 190 p.
- [3]: John P., Donald A., (2010). Microbiologie 3ème Édition, 1216 p.
- [4] : Ayad W.2016/2017. Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des souterraines : cas des puits de la régions d'el harrouche(wilaya de skikda),thèse de Doctorat ; université badji moukhetar -Annaba.
- [5] :MOHAMMEDI.I, MAYOU .O:Evolution du transport solide et la qualité des eauxCas du bassin versant de l'oued Harraza. Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana (2015).
- [6] :KHTTAF.S. 2018. Evaluation physico-chimique de l'eau d'un barrage et proposition d'un traitement adapté pour une eau de haute qualité. THESEE de Doctorat Université El-Hadj Lakhdar -BATNA 1.
- [7] : BERTRAND. G, Utiliser L'eau De Pluie, Editions Eyrolles, 2008, 130 p.
- [8] : VILAGINES R., 2003. Eau, environnement et santé publique. Introduction à l'hydrologie. 2eme Edition : Tec et Doc. Lavoisier. P: 3- 187.
- [9] : FRIEDLI C., 2002. Chimie générale pour ingénieur. Edition : presse polytechniques.
- [10] : DEGREMONT G., 2005.Mémento technique de l'eau. Tome 1, 10eme édition : Tec et doc. P: 3- 38.
- [11] : Molinie L., (2009). Dispositifs rustiques d'alimentation et de Traitement de l'eau potable pour des services de petites tailles en régions défavorisées, Agro Paris Tech, Montpellier, Cedex 4, 7p.
- [12] :Desjardins R., (1997). Le traitement des eaux, Edition de l'école polytechnique de Montréal, 2ème édition, Québec, Canada, PP: 46-112.
- [13] :Banton O. et Bangoy L.M., 1997:Multi science environnementale des eaux souterraines. on revue et améliorée ; 304 p.
- [14] : Bordet J.2007 : L'eau dans son environnement rural; édition Johanet.  
Presses de l'Université du Québec/AUPELF.

## Références bibliographique

---

[15] : OUAHDI A., 1995. Les maladies à transmission hydrique. Santé plus Alger N°45.

[16] : GAUJOUR D., 1985. La pollution des milieux aquatiques: Aide mémoire. Édition: revue et augmenté. P: 49.

[17] : RODIER J. 2005. L'analyse de l'eau: Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer. 8eme édition: Dunod, Paris

[18] : ENCYCLOPÉDIE MÉDICAL, 1997(publication).

[19] : JUERY, J.-M.B.e.C., Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. 2002, Direction de l'Espace Rural et de la Forêt: France.

[20] :Bacchin., P., Principes de base des Technologies a Membranes., in 2'eme Ecole d'Ete Franco-Maghrebine. 2005: Monastir, Tunisia.

[21] :Maïga.A.S 2005.Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'edm.sa dans la ville de bamako : évaluation saisonnière. Thèse de doctorat. bamako

[22] : Charfi, A., Etude d'un procédé membranaire de traitement des eaux usées : effet des paramètres biotiques et abiotiques sur le colmatage de la membrane in l'école doctorale Sciences et Technologies pour l'Ingénieur 2014, Université de Carthage: Tunisie.

[23] : Lanteri, Y., Transport à travers des membranes de nanofiltration: Caractérisation des propriétés

[24]: :a- BERNE.F, JEAN. C, Traitement des eaux, Édition TECHNIP, 1991, 306 plectriques et diélectriques. 2009, UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE: france.

b-.Gabriela Ciobanu, G.C., Lacramioara Istrati, Maria Harja, etude du colmatage des membranes. scientific study & research2006.

[25] Dore M. (1989). Chimie des oxydants et traitement de l'eau. Edition Tec et Doc Lavoisier, France, 505 pages.

[26]: Cardot, C., Techniques appliquées au traitement de l'eau: hydraulique, électrotechnique, procédés de traitement. 2001: Ellipses

[27] : Boumediene M.,2011 : Cours de traitement des eaux; Master 2 en Hydraulique. Option: Eau, Sol et Aménagement

## Références bibliographique

---

- [28] : RODIER .J, l'analyse de l'eau ; eaux naturelles ; eaux résiduaire ; eaux de mer ; édition dunod, 8ème édition ; pages (945 à 1075), 1976
- [29]: TARDAT HENRY. M, Chimie Des Eaux, 2ème Edition, Les éditions du Griffon d'Argile, 1992, pp 213-215
- [30] : BREMOND. R, VUICHARD. R ; Paramètres de la qualité des eaux, Documentation Française, Paris, 1973.
- [31] : RODIER. J, L'analyse De L'eau, Eaux Naturelles, Eaux Résiduaire, 8ème Edition, Dunod, Paris, 1996, 1335p.
- [32]: LEYRAL. G, RONNEFOY. C, GUILLET. F, Microbiologie et qualité des industries agroalimentaire, Paris, 2002, 245p.
- [33] : VALENTIN N., 2000. Gestion des eaux : Alimentation en eau assainissement. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris.
- [34] : Glaude B., Robert P., (2001). Chimie de l'environnement (air, eau ; sol, déchet), de Boeck, Paris, 299 p.
- [35] : Masson M .H., Canu S., Grandvalet Y., Lyngaard-Jensen A., (1999). Software sensor design based on empirical data, Ecological Modelling, N°120, PP: 131-139.
- [36] : BESSEDIK. M. 2015. Traitement et épuration de l'eau, université de Tlemcen.
- [37] Bourrier R., Selmi B., (2011). Technique de la gestion et de la distribution de l'eau, Edition Moniteur, Paris, PP: 353-402
- [38] : Kettab A., (1992). Traitement des eaux, Les eaux potables, Edition: Office des Publications Universitaires, Alger, PP: 111-123.
- [39] : Bassompierre C., (2007). Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, PP: 25-42.
- [40] : Masschelein W.J., (1996). Processus unitaire du traitement de l'eau potable, Edition CEBE, DOC spilliége, PP: 181-345.

## Références bibliographique

---

- [41] : Desille D., (2012). Conservation et traitement de l'eau à domicile, Programme Solidarité Eau, Agence Française de Développement, PP: 12-17.
- [42] :Jestin E., (2006). La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaire, agence de l'eau Seine-Normandie, Hérouville Saint Clair, PP: 17-32. 34p.
- [43] :OMS., (2000). Directives de qualité pour l'eau de boisson; volume 2, critères d'hygiène et documentation à l'appui, 2èmeédition, 1050 p.
- [44] Directive SSIGE pour installations d'eau potable W3, édition 2013.
- [45] : TAMAS, A.P., Étude comparée du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface, in Faculté des sciences et de génie, thèse de doctorat, 2004, université Laval Québec: Québec.
- [46] : Daines Catherine, B.B., élimination de la matière organique dans les concentrats membranaires. 2012: Chemin de la Digue –BP 76 78603 MAISONS-LAFFITTE Cedex france.
- [47] : Ouali M S. (2001). Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux. Edition. Office des publications universitaires. Alger. 156 pages.
- [48] : BERLAND J ; JUERY C ; Décombe 2002 ; les procédés membranaires pour le traitement de l'eau DOCUMENT TECHNIQUE FNDAE N°14 .
- [59] : Houari, A., Caractérisation de biofilms formés à la surface de membranes de nanofiltration dans un processus de production d'eau potable et stratégies de lutte anti-biofilm, in ECOLE Doctorale Science Et Ingenierie. 2009, Université de Cergy-Pontoise: Rouen, france.
- [50] : Wijmans J.G., Baker R.W. (1995). The solution-diffusion model: a review J.Membr. Sci. 107 1-21.
- [51]: Cakaew T. (2009). Procédés Hybrides à membranes pour le traitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. Thèse doctorat. Toulouse. Université de Toulouse.213 pages (l'osmos inerse).

## Références bibliographique

---

- [52] : Arzate, A., Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire. 2008, Centre ACER: Saint-Norbert d'Arthabaska, Québec.
- [53] : J. Goupy. Introduction aux plans d'expériences . 2ème Ed. Dunod, Paris, 2001.
- [54] : J. Goupy. Plans d'expériences pour surfaces de réponse » Ed. Dunod, Paris, 1999..
- [55]: J. Goupy, 1996. Outliers and experimental designs. Chemometrics and intelligent laboratory systems, 35, 145-156.
- [56] :K. Madi, N. Benmehdi, Modélisation et Optimisation par les plans d'expériences du procédé de dégradation photocatalytique d'un colorant azoïque (Jaune Viocryle), mémoire de l'ingénieur, Université A.MIRA de Béjaia, Juin 2010.
- [57] :G. Sado, M.C. Sado, Les plans d'expériences de l'expérimentation à l'assurance qualité, Ed. Afnor Technique, 1991.
- [58] J. Vial, A. Jardy, 1998. Utilisation des plans d'expériences pour évaluer la robustesse d'une méthode d'analyses par C.P.L. Analysis, 26, 15-24.
- [59] : J. Goupy, 1990. Revue de statistique appliquée, tome 38, n°4, Ed. Numdam, 5-44 .
- [60]: E.P.G. Box, G.W. Hunter, J.S. Hunter, Statistics for Experimenters, 2e Ed. John Wiley and Sons, New-York, 2005.
- [61] : D. Benoit, Y.Taubier, S. Germain. Plans d'expériences, construction et analyse Technique et Documentation. Ed. Lavoisier, Paris, 1994.
- [62] :J. Faucher « Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue », Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (France) (2006).
- [63]:J. Goupy «Unconventional experimental designs theory and application », Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 33 (1996) 3-16.
- [64] :V. Kafarov. Méthodes cybernétiques et technologie chimique. Ed. MIR Moscou, 1974.
- [65]:P. Ozil. Plans d'expériences : méthode de TAGUCHI. E.N.S. d'Electrochimie et

## Références bibliographique

---

d'Electrometallurgie INPG-1997

[66] P. Ozil. Plans d'expériences : Méthode de Taguchi. Ecole National Supérieure d'électrochimie et d'électrometallurgie, INP Grenoble - France (2007).

[67] : N. Benabdelhak, «Etude cinétique et modélisation par les plans d'expériences du procédé de dégradation électrochimique du bleu de méthylène sur une électrode de MnO<sub>2</sub>/Ti ». Mémoire de Master, Université de Bejaia (2017).

[68] : I. Yahiaoui, F. Aissani-Benissad, 2010. Experimental design for copper cementation process in fixed bed reactor using two-level factorial design. Arab. J. Chem., 3, 187-190.

[79]: S. Adjabi. Méthodes statistiques de la prévision. Ed. LAMOS université Bejaia.

[70]: J. Goupy. Factorial experimental design: Detecting an outlier with the dynamic variable and the Daniel's diagram Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 80, 156 – 166, 2006 .

[71] : Rodier J., Legube B., Merlet N. (2009). L'analyse de l'eau, 9<sup>ème</sup> édition, Ed. Dunod, 1579p.

[72] : Gregorio C., Pierre-Marie B.,(2007). Traitement et épuration des eaux industrielles polluées: Procédés, Presses Univ. Franche-Comté, 356 p.

[73] : H. Roques; Fondements théoriques du traitement chimique des eaux; Technique et Documentation –Paris (1990).

[74]: J-Rodier, «Analysede l'eau, eau de mer, eau résiduaire», 7<sup>ème</sup>édition, Dunode, Paris, 1984 .

[75]: Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec; Méthode d'analyse; Détermination de la silice réactive dans l'eau : méthode par spectrophotométrie UV-visible, 2016.

[76] : Hernández De León H. R., 2006:Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable, Mémoire pour l'obtention de diplôme de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse

[77] : Brahmi Z. et Benaissa N, 2010: Influence de la coagulation floculation et décantation sur la qualité des eaux épurées de la station de Ain El Houtz; Mémoire d'ingénieur d'état en

## Références bibliographique

---

hydraulique; Département d'Hydraulique, Faculté des sciences de l'Ingénieur, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.

[78] :Huange , c , s . chen et ruhsing pan J .(2000) . Optimal condition for modification of chitosan : a biopolymer for coagulation of colloidal particles , wat . res. 34 (3):1057-1062.

# ANNEXES

---

## Annexe 01: Le matériel utilisé

### A. Les appareils :

#### 1. Une plaque chauffante avec agitateur magnétique

##### ➤ Plaque chauffante

Une plaque chauffante est un appareil de laboratoire portable qui sert de source de chaleur pour chauffer divers objets, elle peut être couplée avec un système d'agitation magnétique afin d'assurer une homogénéisation d'une solution.

##### ➤ Agitateur magnétique

Instrument quasi-indispensable dans un laboratoire de chimie, l'agitateur magnétique sans bain permet d'agiter une solution en utilisant la force magnétique.



**Figure I.1** : Photo de la plaque chauffante avec agitateur magnétique.

#### 2. Une balance

Une balance est un instrument de pesée qui sert à évaluer des masses par comparaison avec des « poids » dans notre étude on a utilisé une balance de précision 0.1 mg de marque RADWAG.

## ANNEXES

---



**Figure I.2 :** Photo de balance de marque RADWAG.

### 3. Turbidimètre

C'est un appareil qui permet de mesurer la turbidité d'un liquide. On utilise un turbidimètre plus précis que les yeux pour déterminer le trouble de l'eau.



**Figure I.3 :** Photo d'un turbidimètre.

### 4. pH mètre

Un appareil permettant de mesurer le pH d'une solution se composant d'un boîtier électronique et d'une sonde dotée de deux électrodes (l'une de référence et l'autre à potentiel variable).

## ANNEXES

---



**Figure I.4 :** Photo d'un pH mètre.

### 5. conductimètre

Un conductimètre est un appareil permettant de mesurer une propriété de conductivité cet appareil est composé d'un générateur basse fréquence, d'un ampèremètre et d'un voltmètre.



**Figure I.5:** Photo d'un conductimètre.

### 6. Spectrophotomètre UV-Visible

Un spectrophotomètre est un appareil qui permet mesurer l'absorbance d'une solution

## ANNEXES

---

à une longueur d'onde donnée ou sur région donnée du spectre.



**Figure I.6:** Photo d'un spectrophotomètre UV-Visible.

### 7. Étuve

Une Étuve est un appareil de chauffage fonctionnant le plus souvent à la pression atmosphérique et permettant d'effectuer divers traitements thermiques à température régulée.



**Figure I.7:** Photo d'une Étuve.

## ANNEXES

---

### 8. Jar-test

Essais de floculation : Jar-test, en plus de la détermination de la dose de coagulant, ces essais permettent de visualiser la floculation et de connaître ses effets aussi bien sur l'eau décantée que sur les boues.



**Figure I.8:** Photo d'un Jar-test .

### 9. Spectrophotomètre d'Absorption Atomique(SAA) :

Un spectrophotomètre est un appareil qui permet mesurer l'absorbance d'une solution à une longueur d'onde donnée ou sur région donnée du spectre.



**Figure I.6:** Photo d'un spectrophotomètre d'Absorption Atomique

## ANNEXES

---

### **B. La verrerie :**

Pipettes 1, 2, 5 et de 10ml ;

Erlenmeyer 100,et de 250ml ;

Burettes graduées 25,et de 50 ml ;

Poire ;

Béchers ;

Pissettes.

Entonnoirs ;

Fioles de 50, 100 et 250ml ;

Eprouvettes 15, 25, 50 , et de 100 ml ;

Barreaux magnétiques ;

Spatules ;

Verres de montre ;

Tubes à essais ;

Porte tubes ;

Mortier et un pilon ;

Dessiccateur ;

Boîtes pétries ;

Embouts ;

Autoclave ;

Bec bunsen ;

Micropipette ;

Pipette Pasture ;

Bains- Marie thermostatiques ;

Bec bunsen ;

Papier filtre ;

Papier absorbant ;

Capsule en porcelaine .

# ANNEXES

---

## ANNEXE N° 02 : préparation de la solution (Laboratoire)

### 1. Préparation d'un V=50 ml d'une solution de Phénophtaléine à 0.5 %

- Phénophtaléine 0.25g
- Ethanol 25ml
- Fiole 50ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 2. Préparation d'un V=50 ml d'une solution de méthyle orange à 0.5 %

- Méthyle orange 0.5g
- Fiole 50ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 3. Préparation d'un V=250ml d'une solution de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 0.02 N

- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 109.9µl
- Fiole 250ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 4. Préparation d'un V=250ml d'une solution tampon ammoniacal à PH =10 :

- NH<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> 16.875g
- NH<sub>4</sub>OH 142.5ml
- Fiole 250ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 5. Préparation de noir erriochrome (N.E.T) :

- Noir d'erriochrome T(N.E.T) 0.5g
- Chlorure de sodium NaCl 50g

Broyer dans un mortier, Conserver à l'abri de lumière

### 6. Préparation d'un v=1000 ml de solution EDTA-Na<sub>2</sub> 0.02N :

- EDTA (poudre séchée pendant 1 heure à 180C°) 3.7298g
- Fiole 1000mL
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 7. Préparation du Murexide :

- Murexide 0.5g
- NaCl 50g

Broyer dans un mortier Conserver à l'abri de la lumière

## ANNEXES

---

### 8. Préparation d'un V=100ml d'une solution d'hydroxyde de sodium NaOH 1N :

- NaOH 2.04g
- Fiole 100ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 9. Préparation d'un V=50 ml d'une solution de Chromate de potassium K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> :

- Chromate de potassium K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> 5g
- Fiole 50ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

Conserver à l'abri de la lumière

### 10. Préparation d'un V=250 ml d'une solution de Nitrate d'argent 0.02 :

- Nitrate d'argent (Ag NO<sub>3</sub> séché) 8.537g
- Fiole 250ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

Conserver à l'abri de la lumière

### 11. Préparation d'un V=100ml d'une solution d'acide chlorhydrique à 50% :

- Acide chlorhydrique pure (HCl) 50ml
- Fiole 100ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 12. Préparation d'un V=100ml d'une solution de Molybdate d'ammonium :

- Molybdate d'ammonium 10g
- Fiole 100ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 13. Préparation d'un V=100ml d'une solution d'acide oxalique :

- Acide oxalique 10g
- Fiole 100ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 14. Préparation d'un V=100ml d'une solution d'hydroxyde de sodium NaOH :

- Hydroxyde de sodium 20g
- Sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique 5g
- Fiole 100ml

## ANNEXES

---

Complété au trait de jauge avec l'eau distillée.

### 15. Préparation d'un V=50ml d'une solution d'azoture de sodium :

- azoture de sodium 25mg
- Fiole 50ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée.

### 16. Préparation d'un V=250ml d'une solution mère étalon d'azote nitrite à 100mg/l :

- nitrate de sodium anhydre 25 mg
- Fiole 250ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée.

### 17. Préparation d'un V=100ml d'une solution fille étalon d'azote nitrite à 10mg/l :

- Solution mère étalon d'azote nitrite 10ml
- Fiole 100ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

### 18. Préparation d'un V=500ml d'une solution de la chaux Ca(OH)<sub>2</sub> :

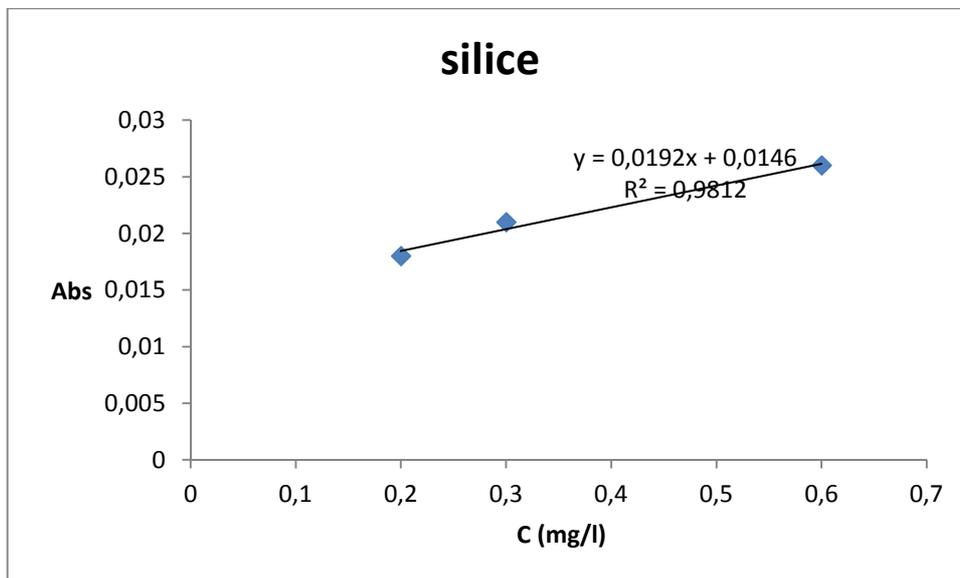
- Ca(OH)<sub>2</sub> 0.063g
- Fiole 500ml
- Complété au trait de jauge avec l'eau distillée

## ANNEXES

### ANNEXE N°03: Courbes d'étalonnage

**Tableau IV : 01** : Établissement de la courbe d'étalonnage pour le dosage de la Silice par colorimétrie à une longueur d'onde fixée à 410nm.

<b>C (mg/l)</b>	0.2	0.3	0.6
<b>Abs</b>	0.018	0.021	0.026



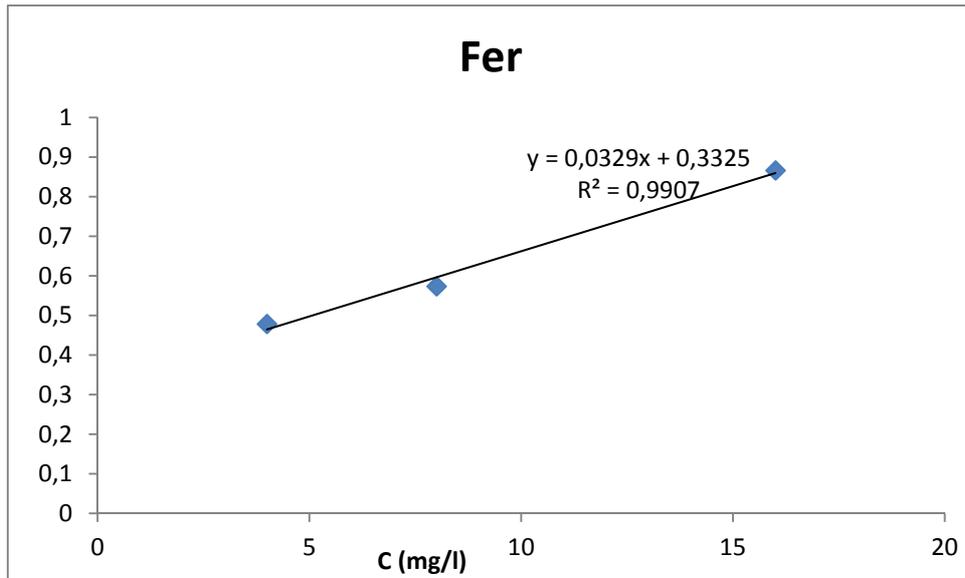
**Figure IV.01: Courbe d'étalonnage de la silice (SiO<sub>2</sub>) par colorimétrie à 410nm.**

**Tableau IV.02** : Établissement de la courbe d'étalonnage pour le dosage du fer par SAA

<b>C (mg/l)</b>	4	8	16
<b>Abs</b>	0.479	0.574	0.867

**Colorimétrie à une longueur d'onde fixée à 510nm**

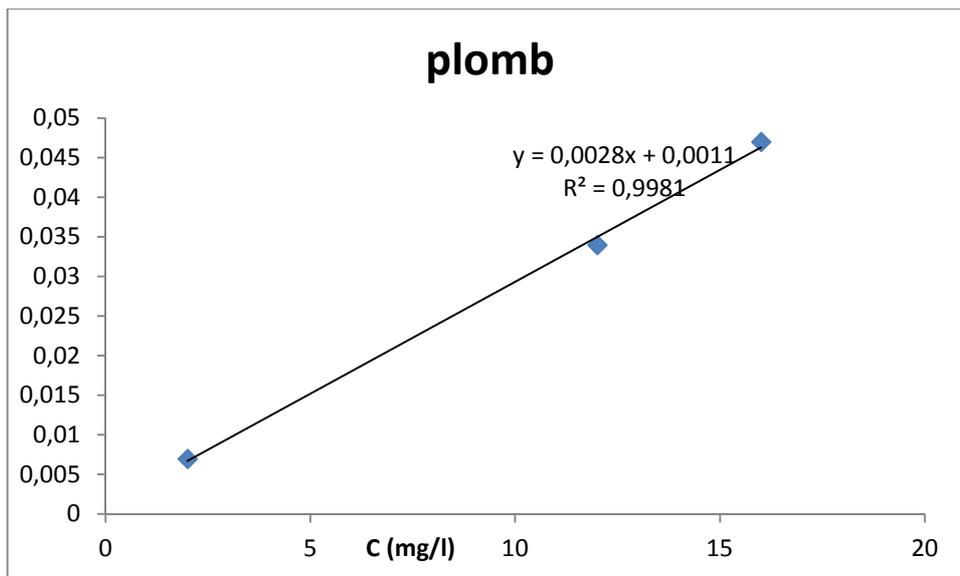
## ANNEXES



**Figure IV.02 : Courbe d'étalonnage du fer par colorimétrie à 510nm**

**Tableau IV.03: Établissement de la courbe d'étalonnage pour le dosage du plomb par SAA**

C (mg/l)	2	12	16
Abs	0.007	0.034	0.047



**Figure IV.03 : Courbe d'étalonnage du fer par colorimétrie à 510nm**

# ANNEXES

## ANNEXE N°04 : Table de Student

DDL	Seuil de risque $\alpha$									
	0.50	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001	0.0001
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.281	63.657	127.32	318.31	636.62	6366.2
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	22.327	34.599	99.992
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.215	12.924	28.000
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610	15.544
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869	11.178
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959	9.082
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408	7.885
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041	7.120
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781	6.594
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587	6.211
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437	5.921
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318	5.694
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221	5.513
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140	5.363
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073	5.239
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015	5.134
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965	5.044
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922	4.966
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883	4.897
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850	4.837
21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819	4.784
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792	4.736
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768	4.693
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745	4.654
25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725	4.619
30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646	4.482
35	0.682	1.306	1.690	2.030	2.438	2.724	2.996	3.340	3.591	4.389
40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551	4.321
45	0.680	1.301	1.679	2.014	2.412	2.690	2.952	3.281	3.520	4.269
50	0.679	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496	4.228
60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460	4.169
70	0.678	1.294	1.667	1.994	2.381	2.648	2.899	3.211	3.435	4.127
80	0.678	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416	4.096
90	0.677	1.291	1.662	1.987	2.368	2.632	2.878	3.183	3.402	4.072
100	0.677	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390	4.053
150	0.676	1.287	1.655	1.976	2.351	2.609	2.849	3.145	3.357	3.998
200	0.676	1.286	1.653	1.972	2.345	2.601	2.839	3.131	3.340	3.970
300	0.675	1.284	1.650	1.968	2.339	2.592	2.828	3.118	3.323	3.944
500	0.675	1.283	1.648	1.965	2.334	2.586	2.820	3.107	3.310	3.922
1000	0.675	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	2.813	3.098	3.300	3.906
infini	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291	3.891

## **Résumé :**

L'eau est une ressource naturelle précieuse et essentielle pour de multiples usages. Son utilisation à des fins alimentaires ou d'hygiène nécessite une excellente qualité physico-chimique et microbiologique. Pour apprécier la qualité de l'eau du puits de forage d'Ibourassen, destinée à l'alimentation de la station de fabrication de l'eau ultrapure de CEVITAL, un contrôle physico-chimique et bactériologique a été réalisé, suivi d'un traitement par coagulation-floculation optimisé par plan d'expériences factoriel à 3 facteurs et à deux niveaux, visant à réduire au seuil minimal les valeurs de 5 paramètres : la conductivité, le TH, THca , TAC, Cl<sup>-</sup> et SiO<sub>2</sub>.

**Mots clés:** eau brute, qualité, physico-chimique, bactériologique, plan d'expérience,

## **Summary**

Water is a precious and essential natural resource for multiple uses. Its use for food or hygiene purposes requires excellent physicochemical and microbiological quality. To assess the water quality of the Ibourassen wellbore, intended for the supply of CEVITAL's ultrapure water production plant, a physicochemical and bacteriological control was carried out, followed by a treatment by coagulation-flocculation optimized by 3-factor factorial and two-level factorial experiments, aimed at reducing to the minimum threshold the values of 5 parameters: conductivity, TH, THca, TAC, Cl<sup>-</sup> and SiO<sub>2</sub>.

**Key words:** raw water, quality, physicochemical, bacteriological, experimental design.