

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

N° D'ORDRE: 73/Meng/2015  
SERIE: 051GP/2015

UNIVERSITÉ CONSTANTINE 3  
FACULTÉ DE GÉNIE DES PROCÉDÉS  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT

**MÉMOIRE**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MAGISTERE EN GÉNIE DES PROCÉDES**

**OPTION: GENIE DES PROCÉDES APPLIQUES A LA RESOLUTION DES PROBLEMES DE  
L'ENVIRONNEMENT**

Par Mr

**BENALIA Abderrezzaq**

**ETUDE EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION DU  
PROCESSUS DE LA COAGULATION  
FLOCCULATION : APPLICATION AUX EAUX  
DESTINÉE A LA CONSOMMATION**

- Jury -

<b>Mr. M. Bencheikh LeHocine</b>	<b>Prof., Université Constantine 3</b>	<b>Président</b>
<b>Mr. K. Derbal</b>	<b>MCA, Université Constantine 3</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr. M. Chikhi</b>	<b>MCA, Université Constantine 3</b>	<b>Examinateur</b>
<b>Mme S. Arris</b>	<b>MCA, Université Constantine 3</b>	<b>Examinatrice</b>

...../...../2015

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

N° D'ORDRE: 73/Meng/2015  
SERIE: 051 G P/2015

UNIVERSITÉ CONSTANTINE 3  
FACULTÉ DE GÉNIE DES PROCÉDÉS  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT

**MÉMOIRE**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MAGISTERE EN GÉNIE DES PROCÉDES**

**OPTION: GENIE DES PROCÉDES APPLIQUES A LA RESOLUTION DES PROBLEMES DE  
L'ENVIRONNEMENT**

Par Mr

**BENALIA Abderrezzaq**

**ETUDE EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION DU  
PROCESSUS DE LA COAGULATION  
FLOCCULATION : APPLICATION AUX EAUX  
DESTINÉE A LA CONSOMMATION**

- Jury -

<b>Mr. M. Bencheikh LeHocine</b>	<b>Prof., Université Constantine 3</b>	<b>Président</b>
<b>Mr. K. Derbal</b>	<b>MCA, Université Constantine 3</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr. M. Chikhi</b>	<b>MCA, Université Constantine 3</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mme S. Arris</b>	<b>MCA, Université Constantine 3</b>	<b>Examinatrice</b>

...../...../2015

## **DEDICACE**

Je dédie ce travail à :

A mon père,

A ma mère,

A mes frères et sœurs,

A toute ma famille,

A toute mes amis

## REMERCIEMENTS

La présente étude n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de certaines personnes. Et je ne suis pas non plus capable de dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'elles ont pu jouer à mes côtés pour en arriver là. Cependant, je voudrais les prier d'accueillir ici tous mes sentiments de gratitude qui viennent du fond de mon cœur, en acceptant mes remerciements.

Mes premiers remerciements vont d'abord à mon directeur de thèse, Monsieur **Derbal Kerroum**, qui m'a accompagné tout au long de ma formation. Sa disponibilité et ses généreux secours au cours de certains de mes moments difficiles ont été d'une très grande qualité, et d'un immense réconfort; merci infiniment Monsieur **Derbal Kerroum**.

Je tiens à remercier le professeur **M. Bencheikh-Lehocine**, qui m'a honoré en acceptant de présider le jury.

Je tiens à remercier Monsieur **M.Chikhi** pour fait l'honneur de participer au Jury de soutenance.

Je remercie également Madame **S.Arris** pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance à Madame **Khirdine Bani**, Madame **Outili .N** et Madame **Zardazi. R** pour l'aide.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur le doyen de la faculté de génie des procédés professeur **A-H Meniai**.

Je tiens à remercier aussi l'équipe du laboratoire LIPE et PFE.

Je remercie évidemment l'équipe du laboratoire de la station de traitement des eaux d'OUED EL ATHMANIA de Mila (**Bouabid.S, Samir, Amina, Nadjat ...**), je les remercie de tout cœur pour leurs aides et leur soutien quotidien, pour ses conseils.

Enfin, merci à tous ceux qui m'ont toujours soutenu.

**SOMMAIRE**

<b>NOMENCLATURE</b>	<b>i</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>vii</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>3</b>
<b>I .La pollution de l'eau</b>	<b>3</b>
<b>I.1.Type de pollution</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1 La pollution physique</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1 La pollution chimique</b>	<b>3</b>
<b>I.1.3 La pollution biologique</b>	<b>4</b>
<b>I.1.4 La pollution thermique</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Origine de la pollution</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1 Pollution domestique et urbaine</b>	<b>4</b>
<b>I.2.2 Pollution agricole</b>	<b>5</b>
<b>I.2.3 Pollution industrielle</b>	<b>5</b>
<b>I.2.4 La pollution d'origine naturelle et l'eau de pluie</b>	<b>5</b>
<b>I.3 Principaux paramètres de pollution des eaux</b>	<b>6</b>
<b>I.3.1 Introduction</b>	<b>6</b>
<b>I.3.2 Paramètres physico-chimique</b>	<b>6</b>
<b>I.3.3 Les paramètres de la pollution particulaire</b>	<b>7</b>
<b>I.3.4 Les paramètres de la pollution organique globale</b>	<b>8</b>
<b>I.3.5 Les paramètres de la pollution dissoute</b>	<b>10</b>
<b>I.3.6 Les paramètres microbiologiques</b>	<b>12</b>
<b>I.4. Impact de la pollution de l'eau sur l'homme et l'environnement</b>	<b>12</b>

---

<b>I.5.Procédés de traitement des eaux</b>	<b>13</b>
<b>I.5.1 Introduction</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2 Les procédés mécaniques</b>	<b>13</b>
<b>I.5.3 Les procédés physiques</b>	<b>15</b>
<b>I.5.4 Les procédés chimiques</b>	<b>16</b>
<b>I.5.5 Procédés biologiques</b>	<b>17</b>
<b>I.5.6 Traitement complémentaire</b>	<b>18</b>
<b>I.6.Chaîne élémentaire de production d'eau potable</b>	<b>20</b>
<b>Chapitre II PROCÉDÉ DE COAGULATION FLOCCULATION</b>	<b>23</b>
<b>II .1 Introduction</b>	<b>23</b>
<b>II .2 Système colloïdale</b>	<b>23</b>
<b>II .2.1 Définition</b>	<b>23</b>
<b>II .2.2 Caractéristiques des colloïdes</b>	<b>24</b>
<b>II .2.3 Structure des colloïdes</b>	<b>24</b>
<b>II .3 Le Processus de la coagulation floculation</b>	<b>25</b>
<b>II .3.1 But de la coagulation-floculation</b>	<b>25</b>
<b>II .3.1.1 Les Suspensions colloïdales – Nécessité de la coagulation</b>	<b>25</b>
<b>II .3.1.2 Théorie de la double couche</b>	<b>26</b>
<b>II .3.1.3 Potentiel Zêta</b>	<b>27</b>
<b>II .3.1.4 La Théorie chimique</b>	<b>28</b>
<b>II .4 Mécanisme de la Coagulation-Floculation</b>	<b>28</b>
<b>II .4.1 La Coagulation</b>	<b>28</b>
<b>II .4.2 La Floculation</b>	<b>31</b>
<b>II .4.3 Facteurs influençant la coagulation</b>	<b>33</b>
<b>II .5 Types des coagulants et floculants</b>	<b>36</b>
<b>II .5.1 Les coagulants minéraux</b>	<b>36</b>
<b>II .5.1.1 Les sels d'aluminium</b>	<b>36</b>
<b>II .5.1.2 Les sels ferriques</b>	<b>39</b>

---

<b>II .5.2 Les coagulant naturels</b>	<b>39</b>
<b>II .5.1.1 Extrait de graines de Morinaga oleifera</b>	<b>41</b>
<b>II .5.1.2 Autres coagulants naturels</b>	<b>42</b>
<b>II .5.1.3 Caractérisation des coagulants naturels</b>	<b>43</b>
<b>II .5.3 Aides-coagulants (adjuvant de floculation)</b>	<b>44</b>
<b>II .5.3.1 Les Flocculants miné raux</b>	<b>44</b>
<b>II .5.3.2 Les Flocculants naturels</b>	<b>44</b>
<b>II .5.4 Les coagulants et flocculants organiques synthétiques</b>	<b>44</b>
<b>II .5.5 Choix du coagulant</b>	<b>45</b>
<b>Chapitre III PROCÉDURE EXPÉRIMENTAL</b>	<b>46</b>
<b>III.1 Origine et caractérisation des eaux brutes utilisées</b>	<b>46</b>
<b>III .2 Description de la partie expérimentale</b>	<b>48</b>
<b>III .3 Méthode et matérielle d'analyse</b>	<b>50</b>
<b>III .3.1 Réactifs utilisés</b>	<b>50</b>
<b>III .3.1.1 Les coagulants miné raux</b>	<b>50</b>
<b>III .3.1.2 les flocculants</b>	<b>51</b>
<b>III .3.1.3 Autre réactifs</b>	<b>51</b>
<b>III 3.1.4 Les coagulants naturels</b>	<b>51</b>
<b>III 3.1.4.1 Introduction</b>	<b>51</b>
<b>III 3.1.4.2 préparation</b>	<b>53</b>
<b>III 3.1.4.3 Caractérisations des bios coagulants</b>	<b>54</b>
<b>III 3.1.4.3.1 Analyses de : pH, densité, COT, CI et CT</b>	<b>54</b>
<b>III 3.1.4.3.2 Analyse des spectres infrarouges</b>	<b>55</b>
<b>III.4 Protocole expérimental</b>	<b>58</b>
<b>III.4.1 Jar Test</b>	<b>58</b>
<b>III.4.2 Pilote de coagulation flocculation décantation</b>	<b>59</b>
<b>III.4.2.1 Principe</b>	<b>59</b>
<b>III.4.2.2 Application des résultats de jar test sur le pilote</b>	<b>60</b>

---

<b>III.4.2.2.1 Cactus traité par NaOH(0.05M)</b>	<b>61</b>
<b>III.4.2.2.2 Aloe Vera traité par l'eau distillée</b>	<b>61</b>
<b>III.4.2.2.3 Acorn traité par NaCl(0.5 M)</b>	<b>61</b>
<b>III.5 Conclusion</b>	<b>62</b>
<b>Chapitre IV RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>63</b>
<b>IV.1 Les coagulants minéraux</b>	<b>63</b>
<b>IV .1.1 Optimisation du pH</b>	<b>65</b>
<b>IV .1.2 Optimisation de la dose du coagulant</b>	<b>67</b>
<b>IV .1.3 Optimisation de la dose du polymère</b>	<b>71</b>
<b>IV .2 Les coagulants naturels</b>	<b>74</b>
<b>IV .2.1 Eau destiné à la consommation</b>	<b>74</b>
<b>IV.2.1.1 Caractéristiques des eaux brutes utilisées</b>	<b>74</b>
<b>IV .2.1.1 Cactus</b>	<b>75</b>
<b>IV .2.1.1.1 Optimisation de la dose du coagulant</b>	<b>75</b>
<b>IV .2.1.1. 2 Optimisation du pH</b>	<b>79</b>
<b>IV .2.1.2 Aloe Vera</b>	<b>80</b>
<b>IV .2.1.2.1 Optimisation de la dose du coagulant</b>	<b>80</b>
<b>IV .2.1.2.2 Optimisation du pH</b>	<b>83</b>
<b>IV .2.1.3 Acorn</b>	<b>83</b>
<b>IV .2.1.3.1 Optimisation de la dose du coagulant</b>	<b>83</b>
<b>IV .2.1.3.2 Optimisation du pH</b>	<b>87</b>
<b>IV .2.2 Eau usée</b>	<b>87</b>
<b>IV .2.2.1 Cactus</b>	<b>88</b>
<b>IV .2.2.1.1 Optimisation de la dose du coagulant</b>	<b>88</b>
<b>IV .2.2.1.2 Optimisation du pH</b>	<b>91</b>
<b>IV.2.2.1 Aloe Vera</b>	<b>92</b>
<b>IV.2.2.1.1 Optimisation de la dose du coagulant</b>	<b>92</b>
<b>IV.2.2.1.2 Optimisation du pH</b>	<b>94</b>



---

<b>IV .2.2.1 Acorn</b>	<b>95</b>
<b>IV .2.2.1 Optimisation de la dose du coagulant</b>	<b>95</b>
<b>IV .2.2.2 Optimisation du pH</b>	<b>98</b>
<b>IV. 3 Effet du temps de séjour du coagulant dans l'eau distillée</b>	<b>99</b>
<b>IV. 4 Effet du temps de décantation après coagulation floculation</b>	<b>99</b>
<b>IV .5 Application sur pilote</b>	<b>100</b>
<b>IV .5.1 Cactus traité par NaOH (0.05 M)</b>	<b>100</b>
<b>IV .5.2 Aloe Vera traité par l'eau distillée</b>	<b>101</b>
<b>IV .5.3 Acorn traité par NaCl (0.5 M)</b>	<b>102</b>
<b>CHAPITRE V MODÉLISATION DE LA DOSE DU COAGULANT</b>	<b>103</b>
<b>V.1 Introduction</b>	<b>103</b>
<b>V.2 Procédure expérimentale</b>	<b>103</b>
<b>V.2.1 Solutions du coagulant</b>	<b>103</b>
<b>V.2.2 Choix des paramètres</b>	<b>104</b>
<b>V.3 Résultats et Discussion</b>	<b>104</b>
<b>V.3.1 Plant factoriel complet</b>	<b>104</b>
<b>V.3.1.1 Construction du plant factoriel complet</b>	<b>104</b>
<b>V.3.1.2 Caractéristiques du problème</b>	<b>105</b>
<b>V.3.2 Plant pour surface de réponse</b>	<b>107</b>
<b>V.3.2.1 Construction du plant pour surface de réponse</b>	<b>107</b>
<b>V.3.2.2 Caractéristiques du problème</b>	<b>108</b>
<b>V.3.2.3 Interprétation</b>	<b>108</b>
<b>V.4 Conclusion</b>	<b>113</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>114</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>117</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>125</b>

## NOMENCLATURE

Ac	:ACORN
$a_i$	:Coefficients du modèle
$AlCl_3$	:Chlorure d'aluminium
$Al_2(SO_4)_3$	:Sulfate d'aluminium
AV	:Aloe Vera
Ca	: Cactus
$C_i$	: Concentration de l'ion i
CI	: Carbone inorganique
COT	: Carbone total organique
CT	: Carbone totale
D	: Constante diélectrique du milieu.
$DBO_5$	: demande biologique en oxygène
DCO	: La demande chimique en oxygène
E	: potentiel redox
EA	: force d'attraction de Van der Waals
E.D	: eau distillé
EDTA	: Éthylène Diamine Tétra-Acétique
ER	: Force de répulsion électrostatique
$F^\circ$	: degré français
$FeCl_3$	: Chlorure ferrique
$Fe_2(SO_4)_3$	: Sulfate ferrique
I	: Force ionique
IR	: Infrarouge
k	: Constante de Boltzmann
K	: Nombre de facteurs
MES	: matières en suspension

MM	: Les matières minérales
M.O	: matière organique
MS	: matière sèche des boues
MVS	: Matières volatile en suspension
NH <sub>4</sub>	:Azotes ammoniacal
NK	:Azotes Kjeldhal
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	:nitrates
NTU	: Nephloметриque turbidity units.
N <sub>2</sub>	: azote gazeux
O.D	: Oxygène dissous
P	: puissance réellement dissipée
Pa	: pascal
PH	: potentiel hydrogène
ppm	: partie par million
PRESS	: Somme des carrées résiduelle
Pt	:phosphor total
Pt Co	:palatine cobalt
Pz	: potentiel zêta
Q <sub>v</sub>	: débit volumique
R	: constante des gaz parfaits
R.S	: Résidu sec
R <sup>2</sup>	: le coefficient de régression
S	: second
T	: Température
t	: temps
TA	: Titre Alcalimétrique
TAC	: Titre Alcalimétrique Complet
TDS	:Total de solides dissous
TH	: dureté totale

tr/min	: tour par minute
TU	: Turbidité
U	: mobilité de la particule
U <sub>inf</sub>	: limites inférieures de variation d'un descripteur
U <sub>i0</sub>	: la variable réelle au centre du domaine expérimental
U <sub>sup</sub>	: limites supérieures de variation d'un descripteur
V	: volume
x <sub>i</sub>	: Variables du modèle
Y	: réponse du modèle
Z <sub>i</sub>	: Valence de l'ion i.
$\alpha$	: Fraction des chocs efficaces
$\mu$	: Viscosité dynamique de l'eau
$\mu\text{s/cm}$	: micro siemens par centimètre
$\sigma$	: Ecart- type
$\Delta U$	: l'écart maximal.

## LISTE DES FIGURES

**Figure I.1:** Origine de la pollution

**Figure I.2 :** Effet de pollution de l'eau sur l'homme et l'environnement

**Figure I.3** Chaîne de traitement

**Figure II.1 :** Energie d'interaction entre deux particules lipophiles en fonction de la distance depuis la surface de la particule

**Figure II.2:** la theorie de la double couche

**Figure II.3:** Représentation schématique de la compression de la couche diffuse

**Figure II.4:** Représentation schématique de l'adsorption et neutralisation des charges

**Figure II.5:** Emprisonnement des particules dans les floes pendant la décantation.

**Figure II.6:** Adsorption et pontage à l'aide d'un polymère

**Figure II.7 :** processus de formation floe

**Figure II.8 :** Diagramme de solubilité dans l'eau de  $Al(OH)_3$  à 25°C

**Figure II.9:**Mécanismes et produits dérivés du sulfate d'aluminium lors de la coagulation

**Figure II.10 :** Vue de *Maringá oleifera*

**Figure II.11:** Vue des quelques coagulants naturels

**Figure III.1:** Appareil Jar Test

**Figure III.2 :** Vue d'un champ de cactus

**Figure III.3 :** Vue d'un champ Aloe Vera

**Figure III.4 :** Vue d'un Acorn

**Figure III.5 :** Vue d'une poudre du coagulant après broyage

**Figure III.6 :** Vue de préparation de bio-coagulant

**Figure III.7 :** spectre infrarouge de Cactus

**Figure III.8 :** spectre infrarouge d'Aloe Vera

**Figure III.9:** spectre infrarouge d'Acorn

**Figure III.10 :** pilote de coagulation floculation décantation mode FSE/EV

**Figure IV.1 :** Effet du pH sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.2 :** Variation de la conductivité et la salinité en fonction du Ph

**Figure IV. 3:** Variation du TA et TAC en fonction du pH

**Figure IV.4:** Variation de la dureté totale et la matière organique en fonction du pH

**Figure IV.5:** Effet de la dose du coagulant sur la réduction de la turbidité et de la couleur

**Figure IV.6:** Variation du pH et la conductivité en fonction de la dose de coagulant

**Figure IV.7:** Variation de la salinité en fonction de la dose du coagulant

**Figure IV.8:** Variation du TA et TAC en fonction de la dose du coagulant

**Figure IV.9:** Variation de TH et MO en fonction de la dose du coagulant

**Figure IV.11:** Effet de la dose du polymère sur la réduction de la turbidité et de la couleur

**Figure IV.12:** Variation du pH et MES en fonction de la dose du polymère

**Figure IV.13:** Variation de la conductivité et salinité en fonction de la dose du polymère

**Figure IV.14:** Variation du TA et TAC en fonction de la dose du polymère

**Figure IV.15:** Variation de TH et M.O en fonction de la dose du polymère

**Figure IV.16 :** Effet de la dose du coagulant (Cactus) sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.17 :** Effet de la dose du coagulant (Cactus) sur le pH

**Figure IV. 18 :** Effet de la dose du coagulant (Cactus) sur l'Alcalinité

**Figure IV.19 :** Effet de la dose du coagulant (Cactus) sur la matière organique

**Figure IV.20 :** Effet du pH sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.21 :** Effet de la dose du coagulant (Aloe Vera) sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.22 :** Effet de la dose du coagulant (Aloe Vera) sur le pH

**Figure IV.23 :** Effet de la dose du coagulant (Aloe Vera) sur l'Alcalinité

**Figure IV.24 :** Effet de la dose du coagulant (Aloe Vera) sur la matière organique

**Figure IV.25 :** Effet du pH sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.26 :** Effet de la dose du coagulant (Acorn) sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.27 :** Effet de la dose du coagulant (Acorn) sur pH

**Figure IV.28 :** Effet de la dose du coagulant (Acorn) sur l'Alcalinité

**Figure IV.29 :** Effet de la dose du coagulant (Acorn) sur la matière organique

**Figure IV.30 :** Effet du pH (Acorn) sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.31 :** Effet de la poudre de Cactus sur la réduction de la turbidité et le pH

**Figure IV.32 :** Effet de la poudre de Cactus sur l'alcalinité et la matière organique

**Figure IV.33 :** Effet de la dose du Cactus sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.34 :** Effet de la dose du Cactus sur le Ph

**Figure IV.35 :** Effet de la dose du Cactus sur l'alcalinité et la matière organique

**Figure IV.36 :** Effet du pH sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.37 :** Effet de la poudre d'Aloe Vera sur la réduction de la turbidité et le pH

**Figure IV.38 :** Effet de la poudre d'Aloe Vera sur l'alcalinité et la matière organique

**Figure IV.39 :** Effet de la dose d'Aloe Vera sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.40** : Effet de la dose d'Aloe Vera sur le pH

**Figure IV.41** : Effet de la dose d'Aloe Vera sur l'alcalinité et la matière organique

**Figure IV.42** : Effet du pH sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.43** : Effet de la poudre d'Acorn sur la réduction de la turbidité et le pH

**Figure IV.44** : Effet de la poudre d'Acorn sur l'alcalinité et la matière organique

**Figure IV.45** : Effet de la dose d'Acorn sur la réduction de la turbidité et le pH

**Figure IV.46** : Effet de la dose d'Acorn sur l'alcalinité et la matière organique

**Figure IV.47** : Effet de la dose d'Acorn sur la réduction de la turbidité et le pH

**Figure IV.48** : Effet de la dose d'Acorn sur l'alcalinité et la matière organique

**Figure IV.49** : Effet du pH (Acorn) sur la réduction de la turbidité

**Figure IV. 50** : Effet du temps dans l'eau distillée sur la réduction de la turbidité (eau potable)

**Figure IV.51** : Effet du temps de décantation sur la réduction de la turbidité

**Figure IV.52** : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité et Ph en fonction du temps de décantation

**Figure IV.53** : Effet du temps de décantation sur la réduction de la turbidité et le pH

**Figure IV.54** : la réduction de la turbidité et pH en fonction du temps de décantation

**Figure V.1** : Diagramme des effets

**Figure V.2** : Diagramme des interactions

**Figure V.3** : Répartition des résidus en fonction de la dose du coagulant calculé

**Figure V.4:** Répartition des résidus sur la droite de Henry

**Figure V.5** : courbe d'iso-réponse : à température fixée

**Figure V.6** : courbe d'iso-réponse : à turbidité fixée

**Figure V.7** : courbe d'iso-réponse : à pH fixe

## **LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau II.1:** Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de STOKES.

**Tableau II.2:** Caractéristique de quelques coagulants minéraux

**Tableau II.3:** Analyse élémentaire des quelques coagulant naturels

**Tableau III.1 :** Caractéristiques des eaux brutes de station d'Oued El Athmania au long d'application des coagulants minéraux

**Tableau III.2 :** Caractéristiques des eaux brutes de station d'Oued El Athmania au long d'application des coagulants naturels

**Tableau III.3 :** Caractéristiques des eaux brutes de station D'IBNZIAD au long d'étude

**Tableau III.4:** Paramètre mesuré et matérielle utilisé

**Tableau III.5:** Caractéristiques des bio-coagulants: (Cactus, Aloe Vera, Acorn)

**Tableau IV.1:** Caractéristiques des eaux brutes de station d'Oued El Athmania

**Tableau IV.2:** Caractéristiques des eaux brutes de station d'Oued El Athmania au long d'application des coagulants naturels

**Tableau IV.3 :** Caractéristiques des eaux brutes de station D'IBNZIAD au long d'étude

**Tableau V.1 :** Répartition statistique des donnés dans le domaine expérimental étudié

**Tableau V.2:** Caractéristiques du problème

**Tableau V.3:** Caractéristiques du problème



## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Le travail de recherche entrepris dans le cadre de ce mémoire de magister concerne en premier lieu une partie expérimentale, qui consiste à étudier le procédé de la coagulation floculation et sédimentation et à déterminer les conditions optimales permettant de réduire les paramètres de pollution des eaux destinées à la consommation ainsi que les eaux usées. La deuxième partie de cette recherche est consacré au développement et à la mise en application d'un modèle numérique en utilisant le logiciel Minitab en introduisant les données expérimentales obtenues à la station de traitements des eaux potable Ouel EL Athmania.

Le travail expérimental de ce mémoire a été réalisée dans deux endroit : une partie au niveau de la station de traitement des eaux destinées à la consommation de Oued El Athmania, et une autre partie au niveaux de laboratoire de l'ingénierie des procédés d'environnement (LIPE). Il a permis d'étudier en premier lieu, l'efficacité des coagulants minéraux tels que le  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $AlCl_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$  ainsi que le rendement du mélange des deux coagulants  $Al_2(SO_4)_3$  et  $FeCl_3$ , de point de vue réduction de la turbidité et amélioration des autres paramètres.

D'autre part une gamme des coagulants naturels tels que le Cactus, l'Aloe Vera et l'Acorn ont été testés dans le but d'étudier leurs efficacité dans le domaine de traitement des eaux destinées à la consommation à faible turbidité. De plus et pour étudier la flexibilité de ces coagulants pour des valeurs de turbidité élevées, une autre étude sur les eaux usées a été réalisée. Pour augmenter l'efficacité de ces coagulants naturels vis-à-vis la réduction de la turbidité, des solvants ont été utilisés. Parmi ces solvants en cite l'eau distillée, le chlorure de sodium, l'hydroxyde de sodium et l'acide sulfurique.

Les paramètres optimums (dose du coagulant et pH) obtenus lors de l'application sur Jar test ont été testés sur le pilote de coagulation floculation sédimentation qui se trouve au niveau de la faculté de génie des procédés, ceci pour les trois coagulants naturels considérés.

Le mémoire est organisé en cinq chapitres, en plus d'une introduction et une conclusion générale, dont le premier constitue une synthèse bibliographique. Rappelant les différentes sources et types de pollution de l'eau, ainsi que les différents paramètres de pollution. De plus une présentation des différents procédés de traitement des eaux de type mécaniques et physico-chimiques et biologiques. Et finalement une présentation de la chaîne classique de traitement des eaux potables qui se compose généralement des prétraitements (dégrillage, tamisage), pré-oxydation (pré-chloration, pré-ozonation et dioxyde de chlore), coagulation-floculation, décantation, filtration et finalement la désinfection.

Le chapitre II présente une introduction sur les matières colloïdales, suivi par la présentation détaillée du procédé de la coagulation floculation. Par la suite une présentation des différents paramètres influençant la coagulation floculation ainsi que les différents coagulants minéraux et naturels utilisés.

Le chapitre III consiste en premier lieu à la présentation des résultats de caractérisation des eaux brutes utilisées (eau potable (faible turbidité) et eau usée (forte turbidité)). De plus une présentation détaillée du matériel utilisé lors de la réalisation de la partie expérimentale ainsi que le protocole expérimental suivi pour la réalisation de cette partie expérimentale.

Dans le chapitre IV sont présentées les analyses et les interprétations des résultats obtenus lors de la réalisation des essais sur le Jar test et sur le pilote, pour différents coagulants minéraux et organiques ainsi que les coagulants traités par des solvants.

Le chapitre V est réservé à la présentation des résultats de la modélisation et simulation de la dose du coagulant considéré. Les données nécessaires pour cette étape sont obtenues de la station de traitement des eaux potables de Oued El Athmania lors de l'utilisation d'un coagulant minéral qui est le sulfate d'alumine appliqués pour une durée d'une année de mesure des différents paramètres tels que la turbidité, le pH et la température.

A la fin une conclusion générale est présentée, où seront rappelés les objectifs fixés et les résultats obtenus avec des recommandations.

## **CHAPITRE I**

### **REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

#### **I La pollution de l'eau**

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique ou biologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et par ses activités. Elle perturbe les conditions de vie et l'équilibre du milieu aquatique et compromet les utilisations de l'eau. [1], [2]

##### **I.1 Types de pollution de l'eau**

Dans le domaine de l'eau, on distingue quatre types de pollution :

###### **I.1.1 La pollution physique**

Due à la présence de matières en suspension et parfois de colloïdes. Elle se traduit par un trouble ou une coloration plus ou moins prononcée [3], les éléments solides entraînés par l'eau subdivisent en plusieurs catégories selon leur nature et leur dimension :

- Les éléments grossiers
- Les sables
- Les matières en suspension (MES)

###### **I.1.2 La pollution chimique**

Due à l'existence de certaines substances chimiques en solution à des taux pouvant provoquer le changement de saveur ou l'apparition d'un caractère toxique de l'eau.

On distingue selon la nature de la pollution chimique deux éléments chimiques:

### **I.1.2.1 Les éléments chimiques minéraux**

L'eau étant un très bon solvant permettra la mise en solution de nombreux composés avec lesquels elle sera en contact.

La dissolution des sels, la corrosion des métaux et dissolution des acides et des bases sont des phénomènes qui donnent lieu à des eaux de rejets caractérisées par certaines formes de pollution dont les plus représentatives sont : la température, le pH, les sels (les nitrates, les chlorures, les sulfates), les métaux lourds.

### **I.1.2.2 Les éléments chimiques organiques**

La matière organique est principalement issue de la décomposition des végétaux, des animaux et des microorganismes. Il est donc difficile d'en donner une description précise ou une composition moyenne. Elle participe à beaucoup des paramètres de qualité de l'eau : couleur, sous produits de désinfection, odeurs, saveurs...etc.

### **I.1.3 La pollution biologique**

Se manifeste lors de l'existence de certains types de microorganismes (des virus, des bactéries, des parasites) capables de se proliférer dans l'eau [4]. Il sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau.

### **I.1.4 La pollution thermique**

Correspond à une forte hausse ou diminution de la température d'un milieu par rapport à la température normale [2], lorsque la température de l'eau augmente, le nombre de particules d'oxygènes dissoutes diminue. La pollution thermique peut être déclencher naturellement comme des sources d'eaux chaudes et des étangs peu profond l'été ou par l'homme comme des déversements d'eau qui a été utilisée pour refroidir des centrales électriques ou d'autres équipements industriels [4].

## **I.2 Origine de la pollution**

### **I.2.1 la pollution domestique et urbaine**

Due principalement aux rejets domestiques (eau de lavage, huile de vidange, matière fécale,...etc.) [5].

La pollution domestique se caractérise par :

- Des germes fécaux ;

- De fortes teneurs en matières organiques ;
- Des sels minéraux (azote, phosphore) ;
- Des détergents [6]

Les polluants urbains sont représentés par les rejets domestiques, les eaux de lavage collectif et de tous les produits dont se débarrassent les habitants d'une agglomération, notamment des rejets industriels rejetés par de petites entreprises.

Le « tous à l'égout » est une expression significative, elle exprime cette diversité. On trouve les excréments, les restes d'aliments, les déversements d'abattoirs, les déversements hospitaliers, les lessives, les détergents, les insecticides, les hydrocarbures, les déchets de la petite industrie et divers produits toxiques.

### **I.2.2 la pollution agricole**

Les activités agricoles sont en particulier largement impliquées dans les apports d'engrais, des lisiers et des purins d'élevage ainsi que les produits phytosanitaires. Lorsqu'ils sont utilisés en excès ces produits parfois toxiques et dont la rémanence dans l'eau peut varier d'un produit à un autre vont contaminer les sols, les eaux de surface et les nappes profondes [7] [8]

### **I.2.3 La pollution industrielle**

Les activités industrielles rejettent un bon nombre des substances qui vont polluer nos rivières et nos nappes, parfois d'une manière intensive que l'on n'en connaît pas les effets à long terme [9].

Les rejets industriels renferment des produits divers sous forme insoluble ou soluble d'origine minérale et/ou organique, à caractère plus ou moins biodégradable et parfois toxique même à très faible concentration.

### **I.2.4 La pollution d'origine naturelle et l'eau de pluie**

La teneur de l'eau en substances indésirables n'est pas toujours le fait de l'activité humaine.

Certains phénomènes naturels peuvent y contribuer (contact de l'eau avec les gisements minéraux, ruissellement des eaux de pluie, irrptions volcaniques,...). En ce qui concerne l'eau de pluie, bien que longtemps considérée comme propre, l'eau d'origine pluviale est en fait relativement polluée. L'origine de cette pollution peut provenir des gaz ou solides en suspension rejetés dans l'atmosphère par les véhicules, les usines ou les centrales

thermiques. Ces polluants (oxyde de carbone, dioxyde de soufre, poussière) sont envoyés vers le sol à la moindre averse.

Lorsqu'elle ruisselle, l'eau de pluie a un second effet nocif: elle transporte les hydrocarbures, les papiers, les plastiques et les débris végétaux accumulés sur la terre et les toitures. De plus, cette pollution est déversée sur de courtes périodes et peut atteindre des valeurs très élevées ce qui provoque un effet de choc sur le milieu biologique.



**Figure I.1:** Origine de la pollution

### **I.3 Principaux paramètres de pollution des eaux**

#### **I.3.1 Introduction**

Pour apprécier la qualité des eaux en général, différents paramètres sont utilisés, parmi ces paramètres :

#### **I.3.2 Paramètres physico-chimique**

##### **I.3.2.1 Température**

Il est primordial de connaître la température d'une eau. En effet, elle joue un rôle très important dans la solubilité des sels et surtout des gaz, et la détermination du pH. La mesure de la température est très utile pour les études et le calcul des Échanges. Elle agit aussi comme un facteur physiologique agissant sur le métabolisme de croissance des micro-organismes vivant dans l'eau.

Les variations de la température affectent diverses propriétés de l'eau telles que la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dissous en particulier l'oxygène et les vitesses des réactions chimiques et biologique [10], [11].

#### **I.3.2.2 pH**

Le pH mesure la concentration des ions  $H^+$  dans l'eau. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique. La valeur du pH altère la croissance et la reproduction des micro-organismes existants dans une eau. [10], Cette mesure physico-chimique effectuée à l'aide d'un pH mètre, permet de savoir si l'échantillon d'eau est acide, basique ou neutre.

#### **I.3.2.3 Conductivité**

La mesure de la conductivité de l'eau nous permet d'apprécier la quantité des sels dissous dans l'eau (chlorures, sulfates, calcium, sodium, magnésium...). Elle est plus importante lorsque la température de l'eau augmente. La conductivité électrique d'une eau usée dépend essentiellement de la qualité de l'eau potable utilisée et du régime alimentaire de la population et des activités industrielles.

#### **I.3.2.4 L'oxygène dissous (O.D)**

La saturation en oxygène de l'eau à la température considérée est assurée par les échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère à travers l'interface air-eau, la fonction chlorophyllienne des végétaux aquatiques élevés la teneur d'oxygène dissous dans l'eau, l'oxydation biologique des matières organiques carbonées joue un rôle très important dans la diminution du taux d'oxygène dans l'eau.

En particulier, les eaux courantes sont plutôt bien oxygénées car, la turbulence de l'eau assure une bonne alimentation en oxygène par le brassage air-eau. Cependant, la solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend encore de la salinité du milieu, de la température et de la pression atmosphérique. A une pression normale de 1 atm, le taux de saturation en oxygène dissous est de 12.5 mg/l à 20°C.

### **I.3.3 Les paramètres de la pollution particulaire**

#### **I.3.3.1 La turbidité**

La turbidité des effluents résiduaire en générale très élevé, elle se définit comme l'expression de la propriété optique qui fait que la lumière est dispersée et absorbée plutôt que transmise en ligne droite à travers l'échantillon. Cette dispersion est provoquée par

l'interaction de la lumière avec les particules en suspension et traduit la réduction de transparence du milieu du fait de la présence de ces particules.

### **I.3.3.2 Les matières en suspension (MES)**

Les matières en suspension, et particulièrement la fraction décantable de celles-ci, peuvent constituer, à l'aval du rejet, des dépôts qui empêchent la vie d'une faune et d'une flore benthiques normales et qui dégradent la qualité de l'eau sous-jacente par le produit des fermentations. Les MES contribuent aussi à déséquilibrer le milieu aquatique en accroissant la turbidité et peuvent avoir un effet néfaste direct sur l'appareil respiratoire des poissons.

La répartition des diamètres de MES varie selon la nature des eaux résiduaires. Le diamètre moyen de la particule en suspension est de l'ordre de 30 à 50  $\mu\text{m}$ .

On peut classer les MES selon leur taille on :

- Les matières démontable qui se séparent naturellement sans apport des réactifs quand l'eau au repos.
- Les matières colloïdales trop fins peu décanté par gravité, mais éliminable par coagulation.

#### **a) Matières volatile en suspension (MVS)**

Elle représente la fraction organique des matières en suspension ; elles sont mesurées par calcination à 550°C d'un échantillon dont on connaît déjà la teneur en MES, elles constituent environ de 70 % à 80% des MES [12].

#### **b) Les matières minérales (MM)**

C'est la différence entre les matières en suspension et les matières volatiles ; sels, silice et poussières.

### **I.3.3.3 La couleur**

La couleur des eaux naturelles est généralement due à la présence en excès de certains minéraux (le fer par exemple) et également certain organique, ce paramètre est lié à la turbidité et à la transparence de l'eau.

Leurs élimination par traitement est indispensable pour rendre l'eau agréable à boire. Il est important de dire qu'une eau présentant une belle couleur n'est forcément potable [103].



### **I.3.4 Les paramètres de la pollution organique globale**

#### **I.3.4.1 La demande chimique en oxygène (DCO)**

La demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydable dans certaines conditions opératoires ; il s'agit de l'un des paramètres spécifiques que l'on a utilisés pour déterminer la concentration des pollutions principales. La DCO c'est une mesure globale des matières organiques et de certains sels minéraux oxydables, à la différence de la  $DBO_5$  qui ne prend en compte que les matières organiques biodégradables.

La DCO nous permet d'apprécier la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale ; ainsi par la mesure de la DCO, on pourra évaluer la charge polluante d'une eau usée en matières organiques avant et après un traitement physique, chimique ou biologique afin de contrôler le fonctionnement d'une station de traitement l'activité des micro-organismes [13].

#### **I.3.4.2 La demande biologique en oxygène ( $DBO_5$ )**

La demande biochimique en oxygène est la quantité d'oxygène consommée dans des conditions d'essai spécifiques (incubation pendant 5 jours, à 20°C dans l'obscurité) par les micro-organismes présents dans l'eau, pour assurer la dégradation de la matière organique par voie biologique.

La  $DBO_5$  représente plus particulièrement une mesure de la charge polluante d'origine carbonée (pollution organique, biodégradation en fait). Elle fournit donc une des indications importantes permettant de juger de la qualité d'eau et de son degré de pollution. Par contre c'est un test reconnu trop peu précis pour qualifier les eaux naturelles mais très utilisé pour surveiller l'efficacité des stations d'épuration [14].

#### **I.3.4.3 Le carbone total organique (COT)**

Détermine des propriétés variables du carbone organique dissous et particulaire, du carbone organique provenant de substances volatils et du carbone minéral dissous.

Sa mesure est réalisée par un analyseur de  $CO_2$  à infrarouge après combustion catalytique à haute température de l'échantillon [15].

#### **I.3.4.4 Matières organiques oxydables (KMnO<sub>4</sub>)**

Les matières organiques, sont des matières oxydables qui nécessitent pour leur décomposition une certaine quantité d'oxygène. Elles vont appauvrir le milieu naturel en oxygène, c'est pourquoi elles sont considérées comme des matières polluantes, on utilise un oxydant, le permanganate de potassium (KMnO<sub>4</sub>), qui, dans des conditions opératoires précises, va oxyder des molécules présentes dans l'eau. Ces molécules sont essentiellement des molécules organiques mais des molécules minérales peuvent être également oxydées et l'on devrait parler plutôt de matières oxydables [13], [14].

#### **I.3.5 Les paramètres de la pollution dissoute**

##### **I.3.5.1 Les éléments nutritifs**

On distingue cinq formes d'azote que l'on rencontre dans l'environnement :

##### **I.3.5.1.1 L'azote organique**

Constituant les cellules vivantes végétales ou animales

##### **I.3.5.1.2 L'azote ammoniacal (NH<sub>4</sub>)**

Provenant de la décomposition par des bactéries de l'azote organique ou des rejets directs d'animaux (urines).

L'ensemble de l'azote organique et l'azote ammoniacal correspond l'azote Kjeldhal (N<sub>K</sub>)

$$N_K = N_{\text{org}} + N_{\text{ammoniacal}}$$

##### **I.3.5.1.3 Les nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)**

Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque soit d'une réduction des nitrates sous l'influence de l'action dénitrification.

Les nitrites se trouvent toujours en quantité faible étant donné leur forme instable [14].

##### **I.3.5.1.4 Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

Les nitrates constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique.

Leurs formes sont très stable dont la présence dans l'eau peut présenter un double gêne ; d'une part pour les mêmes raisons que les nitrites et d'autre part ils constituent agent fertilisant susceptible de favoriser le développement excessif d'algues dans le milieu récepteur (phénomène d'eutrophisation) [14].

### I.3.5.1.5 L'azote gazeux (N<sub>2</sub>)

Très présent dans l'air (70% de N<sub>2</sub> pour seulement 20% de O<sub>2</sub>) ; et peu soluble dans l'eau.

- l'ensemble des formes azotées constitue l'azote global noté NGL

$$\text{NGL} = \text{N}_K + \text{N}_{\text{NO}_2^-} + \text{N}_{\text{NO}_3^-}$$

- L'azote dans les eaux usées urbaines est présent principalement sous forme d'azote organique et ammoniacal, on constate le plus souvent l'absence de nitrites et de nitrates dans ces effluents.

La pollution azotée peut être à l'origine de plusieurs problèmes dont le plus aiguë provient de la toxicité de l'ammoniaque dans le milieu récepteur entraîne une consommation d'oxygène due à la nitrification bactérienne qui peut être nuisible à la faune. Un autre problème plus chronique due à la pollution azotée est le phénomène d'eutrophisation du milieu naturel [16].

### I.3.5.2 Le phosphore total (Pt)

Le phosphore est présent sous différentes formes :

- **Le phosphore organique** : élément constitutif de biomolécules comme les phospholipides et les phosphoprotéines.
- **Le phosphore minéral** : dérive de l'acide phosphorique comme les ortho phosphates (PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, HPO<sub>4</sub>) ou condensé comme les poly phosphates ;
- L'ensemble des formes organique et minérales constitue le phosphore total (Pt).

La présence de phosphore dans les eaux de surface entraîne un développement important des algues qui est caractérisé par le phénomène d'eutrophisation.

### I.3.5.3 Les Chlorures

Les chlorures existent dans toutes les eaux usées à des concentrations très variables.

L'origine peut être naturelle.

De l'activité humaine :

- Rejets humains (en partie l'urine) ;
- Industries extractives et dérivées (chaudières, salines, mines, de potasse et industries pétrolières) [17].

#### **I.3.5.4 Métaux lourds**

On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels dont la masse volumique dépasse  $5 \text{ g/cm}^3$ . Ils sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces : Plomb, Cadmium, Cuivre, Zinc, Manganèse...etc. Le plus Toxiques d'entre eux sont le Plomb et le Cadmium.

Ils sont dangereux pour l'environnement, car ils ne sont pas dégradables, même si les métaux lourds sont le plus souvent présents à l'état de trace, ils n'en restent pas moins très dangereux, puisque leur toxicité se développe par bioaccumulations dans les organismes [17].

Les métaux lourds présents dans les eaux peuvent provenir de deux origines principales :

- Une origine naturelle liée essentiellement à la dégradation partielle des roches métallifères et au lessivage des terrains miniers par les eaux de pluie ;
- Une origine due aux activités humaines, domestiques, agricoles et industrielles.

#### **I.3.6 Les paramètres microbiologiques**

L'eau ne doit contenir ni microbes, ni bactéries pathogènes, ni virus qui pourraient entraîner en contamination biologique et être la cause d'une épidémie.

Le dénombrement bactérien consiste à recherché des bactéries 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.

La présence de coliformes fécaux ou de streptocoques fécaux indique une contamination de l'eau par des matières fécales. La présence d'autre coliforme, de clostridium ou de staphylocoques laisse supposer une contamination de ce type. Dans les deux cas ; des mesures doivent être prises pour interdire la consommation de l'eau ou en assurer le traitement [18].

#### **I.4 Impact de la pollution de l'eau sur l'homme et l'environnement**

Une eau contaminée peut avoir des impacts négatifs importants sur l'homme et l'environnement, de même, le contact de l'eau avec notre peau, nos yeux, nos oreilles ou notre nez peut aussi être la cause de certaines maladies, ainsi l'eau que l'on boit peut aussi avoir des effets sur notre santé [99].

L'eau polluée cause des maladies très graves tels que le choléra, les gastro-entérites. Elles sont causées par des bactéries, des virus...etc. La pollution a des effets cumulatifs toxiques. Ils manifestent leur nocivité qu'après un temps assez long [100].

Plusieurs études s'attardent à découvrir les impacts sur la santé des produits toxiques contenus dans l'eau. Par exemple, depuis une quinzaine d'années, une dizaine d'études épidémiologiques dans divers pays ont mis l'accent sur un rôle probable de l'aluminium présent dans l'eau de consommation sur l'incidence de la maladie d'Alzheimer [99].



**Figure I.2 :** Effet de pollution de l'eau sur l'homme et l'environnement

## **I.5 Procédés de traitement des eaux**

### **I.5.1 introduction**

L'eau disponible dans la nature n'est souvent directement utilisable ni pour la consommation humaine ni pour l'industrie car elle n'est pas suffisamment pure -La présence des différentes impuretés impose le traitement des eaux avant utilisation pour la rendre aptes aux applications envisagées ou après utilisation pour éviter tout dommage à notre environnement [20].

En fonction de la qualité de l'eau brute, les procédés de base et les traitements sont multiples :

### **I.5.2 Les procédés mécaniques**

Ils sont constitués d'un ensemble d'opérations mécaniques :  
Dégrillage, tamisage, dessablage et déshuilage - dégraissage [21].

### **I.5.2.1 Dégrillage**

Le dégrillage permet de protéger la station contre l'arrivée intempestive de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation [15]

Dans un premier temps a lieu la phase appelée dégrillage qui consiste à évacuer les matières les plus volumineuses à l'aide d'un système comparable à un filtre géant.

Néanmoins, si l'eau est très chargée en déchets, on peut alors procéder au tamisage, qui est un dégrillage plus poussé avec des mailles allant de 0,3 à 100 $\mu$ m de large [22].

### **I.5.2.2 Tamisage**

Le tamisage assure un dégrillage poussé par filtration des eaux brutes sur toile, treillis ou tôle, perforée à mailles plus ou moins fines.

### **I.5.2.3 Dessablage**

Le dessablage à pour but d'extraire des eaux brute les graviers, les sables et les particules minérales plus ou moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduites, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion et éviter les surcharger des stades de traitement [23]

### **I.5.2.4 Déshuilage-Dégraissage**

Les opérations de dégraissage et de déshuilage consistent en une séparation de produits de densité légèrement inférieure à l'eau par effet de flottation, naturelle ou assistée.

Le déshuilage est une opération de séparation liquide - liquide permet d'éliminé les huiles présentes en quantité notable dans les eaux résiduaires.

Le dégraissage est une opération de séparation liquide-solide réalisant un compromis entre une rétention maximale des graisses et un dépôt minimal de boues de fond fermentescibles [15].

### **I.5.3 Les procédés physiques**

Les procédés physiques permettent de séparer des molécules ou des espèces ioniques indésirables, ou économiquement récupérables de leur environnement liquide ou gazeux mettent en œuvre diverses techniques telles que : [11]

#### **I.5.3.1 Décantation**

La décantation a pour but de permettre le dépôt des particules en suspension dans l'eau, soit ces particules existent dans l'eau brute soit qu'elles résultent de l'action d'un réactif chimique ajouté artificiellement, soit encore qu'elles résultent d'une floculation physique liée à une action biologique [23].

#### **I.5.3.2 Flottation**

Réalisant une décantation inversée est une opération de séparation par laquelle on amène les substances solides en suspension ; généralement finement dispersées dans l'eau, dans un complexe plus léger, constitué essentiellement par une mousse d'air qui flotte à la surface de l'eau et que l'on sépare soit par débordement, soit par raclage mécanique [24].

#### **I.5.3.3 Les techniques membranaires**

Une membrane est une barrière qui contrôle le transport des espèces chimiques entre deux phases fluides qu'elle sépare. Elle oppose une résistance inégale au transport de différentes espèces quand une force motrice (comme par exemple un potentiel électrique ou une pression) est appliquée sur les fluides. La séparation des polluants est essentiellement fondée sur leur affinité pour la membrane sur la taille et/ou sur la charge électrique des molécules et d'ions [25].

#### **I.5.3.4 L'adsorption**

L'adsorption est un phénomène de fixation superficielle sur un corps solide appelé adsorbant, d'un gaz, d'une vapeur, d'un liquide ou d'un soluté, appelé adsorbé. L'adsorption en phase liquide utilisée en traitement d'eaux résiduaires, essentiellement en finition permet l'élimination des composés organiques peu ou pas biodégradables constituant la DCO « dur » par ailleurs souvent à l'origine de la coloration [24].

#### **I.5.4 Les procédés chimiques**

Certains éléments chimiques (chlore, ozone, gaz désinfectant) sont utilisés pour agir sur les métaux et pour détruire les germes. Enfin, des procédés de neutralisation ou d'acidification permettent de contrôler le pH de l'eau.

##### **I.5.4.1 Coagulation-Floculation**

La coagulation-floculation est un procédé couramment employée en épuration primaire des eaux usées industrielles, ce procédé permet de se débarrasser des MES et des particules colloïdales qui ne peuvent décanter par elles mêmes, afin de diminuer par exemple les teneurs en DCO, DBO<sub>5</sub>, et COT, ou encore la turbidité de l'eau [25].

##### **I.5.4.2 La neutralisation**

A pour objet de modifier le pH d'une eau résiduaire pour l'amener à une valeur déterminée pour favoriser un traitement ultérieur ou permettre le rejet dans un milieu récepteur. Il s'agit d'une opération dans laquelle on ajoute à une eau a caractère basique ou acide une quantité suffisante soit d'acide soit de base de manière à réaliser un échange protonique complet entre les deux constituants [24].

##### **I.5.4.3 La précipitation**

La précipitation est une méthode très largement utilisée pour éliminer les composés solubles le plus souvent minéraux contenus dans les rejets, en l'occurrence les sels (carbonates, sulfates, fluorures ...), les phosphates a l'origine de l'eutrophisation et les métaux lourds a caractère toxique (Cu, Pb, Cd...). Elle consiste à ajouter à l'eau résiduaire un réactif appelé précipitant de manière à ce que le produit de la réaction présente une solubilité aussi faible que possible et puisse, de cette façon être séparé de l'eau sous forme solide [24].

L'efficacité de la précipitation dépend non seulement du pH mais aussi de choix du réactif, de la température, du degré de valence du métal dans l'eau et du potentiel Zêta [25].

##### **I.5.4.4 L'oxydoréduction**

L'oxydoréduction est une opération par laquelle on ajoute à une eau contenant une substance a caractère oxydant ou réducteur une quantité suffisante soit d'un réducteur soit



d'un oxydant de manière à réaliser un échange électronique complet entre les deux constituants [24].

### **I.5.5 Procédés biologiques**

Ils constituent le mode classique de dépollution de la pollution organique carbonée et azotée. Les techniques d'épuration biologique reposent sur les conditions qui permettent aux flores microbiennes de développer pour assurer la dégradation des matières organiques polluantes, éliminées dans la mesure où elles servent d'aliments aux bactéries à condition qu'elles soient biodégradables [24].

La mise en œuvre de l'épuration biologique aérobie est réalisée suivant deux types de techniques :

#### **I.5.5.1 Les procédés à cultures libres**

##### **➤ Boues activées**

Le procédé à boues activées est un système fonctionnant en continu dans lequel, les micro-organismes sont mis en contact avec les eaux usées contenant des matières organiques. De l'oxygène est injecté dans le mélange, permettant de fournir aux bactéries ce qui leur manque. On peut considérer que le système à boues activées est une extension artificielle des phénomènes d'épuration naturels [12].

##### **➤ Lagunage**

Ce système d'épuration consiste à stocker l'eau usée dans de grands bassins de faible profondeur appelés lagunes, étangs d'oxydation ou étangs de stabilisation.

Le temps de séjour dans ce bassin peut atteindre plusieurs semaines et même plusieurs mois.

A l'intérieur de ces étangs, l'apport d'oxygène est essentiellement dû à l'activité de photosynthèse des algues qui s'y développent. Les matières organiques sont oxydées alors par voie bactérienne pour produire CO<sub>2</sub> et éléments nutritifs nécessaires au développement des algues productrices d'oxygène.

Cependant, dans les couches les plus profondes de la lagune, il est difficile d'éviter les phénomènes d'anaérobiose; si ceux-ci sont limités, ils se produisent seulement une décomposition anaérobie d'une partie des matières organiques introduites [26].

### I.5.5.2 Les procédés à cultures fixées

#### ➤ Les lits bactériens

Ce procédé consiste à alimenter en eau usée, préalablement décantées sur une masse de matériaux poreux ou caverneux qui reste du support aux micro-organismes (bactéries) épurateurs qui y forment un film biologique responsable de l'assimilation de la pollution. Une aération est pratiquée soit par tirage naturel soit par ventilation forcée, il s'agit d'apporter l'oxygène nécessaire au maintien des bactéries aérobies en bon état de fonctionnement, les matières polluantes contenues dans l'eau et l'oxygène de l'air diffusent, à contre courant à travers le film biologique jusqu' aux micro-organismes assimilateur, le film biologique comporte des bactéries aérobies à la surface et des bactéries anaérobies près de fond [14].

#### ➤ Biofiltres

La bio filtration est une technique qui vise à réaliser simultanément, dans le même ouvrage, la réaction de dégradation aérobie de la pollution par la biomasse fixée sur le matériau et la clarification par filtration de l'effluent traité, le procédé permet de se affranchir d'un clarificateur aval, mais implique cycliquement la régénération du réacteur par des technologies mises en œuvre par filtration sur sable.

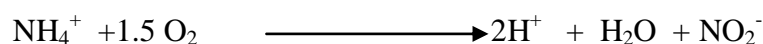
### I.5.6 Traitement complémentaire

#### ➤ Nitrification-Dénitrification

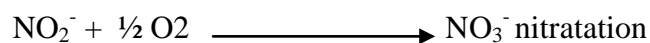
L'élimination de l'azote est réalisée par l'intermédiaire de réaction enzymatique qui se produit dans des conditions bien définies en présence ou absence d'oxygène, en deux étapes successives. Dans le premier stade, par l'intermédiaire de micro-organismes strictement aérobie autotrophes s'opère l'oxydation de l'ammoniaque en nitrates (nitrification) après ammonification préalable de l'azote organique selon les réactions suivant :



1- oxydation de  $NH_4^+$  en  $NO_2^-$  (nitritation)

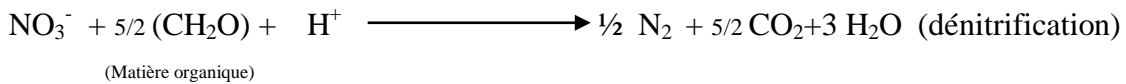


2- oxydation de  $NO_2^-$  en  $NO_3^-$  (nitratación)



Nitritation + nitratación  $\longrightarrow$  nitrification

Dans un second stade, la réduction des nitrates en azote gazeux est réalisée par des bactéries hétérotrophes en l'absence stricte d'oxygène, mais en présence d'un substrat carboné, puis généralement dans l'effluent brut. Selon la réaction [24]



### ➤ Désinfection

L'opportunité de la mise en œuvre de cette étape de traitement peut se justifier dans un certain nombre de cas : protection sanitaire des zones de baignade et de loisirs, protection sanitaire des zones littorales abritant des activités industrielles et réutilisation d'effluents à des fins d'irrigation, etc.

Les germes pathogènes présents dans les effluents sont très divers ; ils restent cependant peu nombreux par rapport aux germes d'origines tellurique et fécale non pathogènes qui les accompagnent.

L'évaluation du risque de contamination et l'efficacité de la désinfection sont donc généralement appréhendées via le dénombrement de germes indicateurs (coliformes totaux, coliformes fécaux, streptocoques fécaux). Les procédés de désinfection les plus couramment mis en œuvre font appel au chlore ou à ses dérivés, à l'ozone ou au rayonnement ultraviolet.

- L'utilisation du chlore est la plus ancienne mais elle présente des contraintes de transport et de manutention. Pour agir correctement, le chlore impose d'une part que l'eau soit préalablement bien épurée et, d'autre part, qu'un temps de contact de 30 min soit respecté.

Le chlore se combine à l'ammoniac contenu dans l'eau pour former des chloramines qui deviennent alors l'agent désinfectant. Ces sous-produits moins efficaces que le chlore lui-même et leur rémanence dans l'environnement, en parallèle avec divers produits de réaction du chlore et des matières organiques résiduelles, les rendent toxiques pour la faune et la flore aquatique [10].

Si le chlore est peu onéreux et donne de bons résultats sur les bactéries, il s'avère cependant peu efficace sur les virus.

- Dérivé du chlore, le bioxyde de chlore ( $\text{ClO}_2$ ) peut être produit directement sur le site. Plus puissant que le chlore en termes d'efficacité désinfectante, il agit directement sur les germes pathogènes.

Toutefois, sa mise en œuvre est très délicate et nécessite une surveillance continue et permanente.

- L'ozone offre un large spectre d'action. Il est efficace aussi bien contre les virus que contre les bactéries et agit avec un temps de contact de courte durée (10 min). Produit sur site, il nécessite pour son exploitation du personnel qualifié.

Les doses habituellement adoptées se situent entre 2 et 5 g/m<sup>3</sup> d'ozone.

- La désinfection aux ultraviolets tend à se développer de façon plus intense car elle présente un certain nombre d'avantages comme des temps de contacts très courts, pas d'utilisation de produits chimiques, une bonne efficacité sur les bactéries et sur les virus.

Les premières phases du traitement, le dégrillage, le dessablage/déshuilage et la phase anaérobie du traitement biologique sont généralement confinées dans des bâtiments plus ou moins étanches afin que les mauvaises odeurs ne se répandent pas dans l'environnement de la station. Ce qui provoquerait des nuisances olfactives inacceptables par les riverains. Cet air nauséabond est collecté et traité. Il passe par trois tours de lavage : une d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), une de Javel et une de soude [27].

## **I.6 Chaîne élémentaire de production d'eau potable**

L'industrie de l'eau a une pression croissante pour produire une eau traitée de plus grande qualité à un coût plus faible. Les eaux à visée de potabilisation pour la consommation humaine sont de différentes natures. Les eaux souterraines constituent 22 % des réserves d'eau douce soit environ 1000 milliards de m<sup>3</sup> [28]. Elles sont généralement d'excellente qualité physico-chimique et bactériologique. Néanmoins, les terrains traversés en influent fortement la minéralisation. Les eaux de surface se répartissent en eaux courantes ou stockées. Elles sont généralement riches en gaz dissous, en matières en suspension et organiques, ainsi qu'en plancton.

Le schéma classique d'une station de potabilisation d'une eau de surface est généralement comporte cinq grandes étapes (**Figure I.3**).

Les filières de la chaîne de traitement, à savoir le prétraitement (dégrillage, tamisage), la clarification (coagulation-floculation, décantation), et la désinfection ont été définies précédemment ;

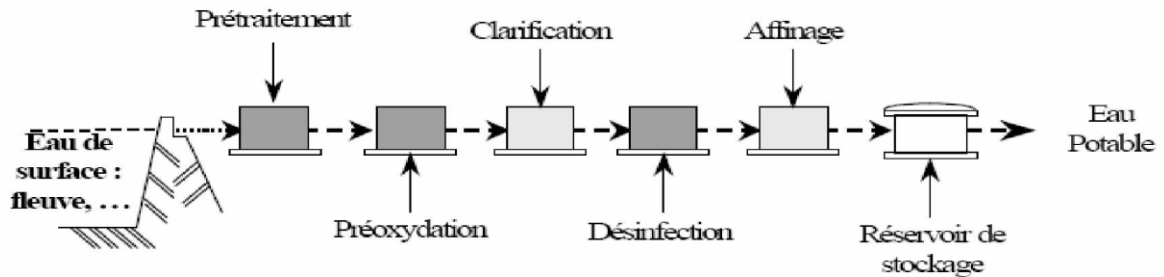


Figure I.3 Chaîne de traitement

Les autres filières de la chaîne de traitement sont :

### ➤ Pré-oxydation

C'est un procédé chimique qui utilise le chlore (ou l'hypochlorite de sodium), l'ozone, le dioxyde de chlore ou le permanganate de potassium. Il est destiné à permettre l'élimination du fer et du manganèse, de matière organique, de la couleur et des algues :

- **Ajout de Chlore (pré-chloration)**

La pré-chloration est effectuée avant le procédé de clarification. Le chlore est le réactif le plus économique, mais il a comme inconvénient de former avec certains micropolluants des composés organochlorés du type chloroforme ou des composés complexes avec les phénols du type chlorophénol dont le goût et l'odeur sont désagréables [29].

- **Ajout de dioxyde de chlore**

On préfère utiliser le dioxyde de chlore qui coûte plus cher mais qui n'a pas les inconvénients de l'oxydation par le chlore cités ci-dessus, lui aussi, des inconvénients non négligeables comme sa décomposition à la lumière, ce qui entraîne une augmentation du taux de traitement à appliquer en période d'ensoleillement.

- **Ajout d'ozone (pré-ozonation)**

La pré-ozonation est l'oxydation des matières organiques, et une élimination plus importante de la couleur. Un autre avantage est la diminution du taux de traitement (taux de coagulant) dans le procédé de clarification.

➤ **La filtration**

La filtration est un procédé physique de séparation solide/ liquide qui utilise le passage à travers un milieu poreux qui retient les particules en suspension dans l'eau brute ou l'eau prétraitée, elles se déposent et absorbent les matières minérales ou organiques qui arrivent ultérieurement [30],[31],le filtre à sable est le type de filtre le plus utilisé dans le traitement des eaux de consommation.

D'une façon générale, on distingue deux types de filtration [32], [33] 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 est une opération relativement complexe mais palliant aux inconvénients de la première.

➤ **Affinage**

L'affinage est procédé d'éliminer les micropolluants qui existent déjà dans l'eau ou qui se sont formés au cours du traitement et qui n'ont pas été totalement abattus par la coagulation-floculation.

Cet affinage est réalisé par le phénomène d'adsorption, généralement sur du charbon actif. Celui-ci est mis en œuvre soit en poudre au cours de la floculation et sera par la suite évacué avec la boue, soit sous forme de grains, habituellement utilisé après filtration sur sable [30], [34].

## **CHAPITRE II**

### **PROCÉDÉ DE COAGULATION FLOCCULATION**

#### **II .1 Introduction**

La coagulation floculation est un processus physico-chimique facilitant l'élimination des MES et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floccs dont la séparation est ensuite effectuée par des systèmes de décantation, flottation et / ou filtration. Selon l'objectif de traitement et le type de rejet considéré elle peut être utilisée comme prétraitement, traitement principale ou complémentaire dans la chaîne de traitement [29], [34].

#### **II .2 Système colloïdale**

##### **II .2.1 Définition**

L'eau contient de nombreux composés qui peuvent se regrouper en trois catégories [38].

➤ **Matières en suspension**

Ces produits peuvent être d'origine minérale (sables, limons, argiles, ...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales ou animales, acides humiques par exemple). A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que bactéries, algues et virus. Ces substances sont responsables, en particulier, de la turbidité et de la couleur.

➤ **Matières colloïdales** (moins de 1 micron)

Ce sont des MES de même origine que les précédentes mais de plus petite taille, dont la décantation est excessivement lente. Elles sont également génératrices de turbidité et de couleur.

- **Matières dissoutes** (moins de quelques nanomètres)

Ce sont généralement des cations ou des anions. Une partie de la matière organique est également sous forme dissoute. On trouve aussi des gaz ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ , ...) [38]

## II .2.2 Caractéristiques des colloïdes

- le rapport (surface/volume) est élevé les phénomènes de surface sont importants
- la stabilité d'une suspension colloïdale repose sur l'existence des forces répulsives de nature électrostatique
- les particules ne peuvent s'agglomérer [38]

## II .2.3 Structure des colloïdes

### II .2.3.1 Macromolécule organique (Hydrophiles)

Les particules hydrophiles présentent une grande affinité avec l'eau. Ces particules sont entourées d'une enveloppe d'eau fixée par des liaisons physico-chimiques à certains groupement de la matière tels que  $-COOH$ ,  $-NH_2$ , ou  $-OH$  [41]. Les particules colloïdales hydrophiles sont le plus souvent de nature organique. Parmi les substances de cette nature on peut citer les protéines, les savons, la gélatine et la matière organique naturelle. Les colloïdes hydrophiles sont plus difficiles à déstabiliser que les solutions hydrophobes. En effet, il faut agir d'abord sur les molécules d'eau qui les entourent pour permettre leur agglomération [42].

### II .2.3.2 Colloïdes de nature minérale (Hydrophobes)

Les particules hydrophobes n'ont aucune affinité pour l'eau. Leur stabilité est due à la charge électrique que portent ces particules qui engendre une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération [42].

Ce sont en général des particules minérales telles que la silice et les argiles [42].

En général peu des colloïdes sont exclusivement hydrophiles ou hydrophobes. La différence se fait sur la présence ou non de groupement de type hydrophile qui induira un degré d'hydratation plus ou moins important.



## II .3 Le Processus de la coagulation floculation

### II .3.1 But de la coagulation-floculation

L'opération de coagulation-floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par déstabilisation des particules en suspension puis formation des floccs par absorption et agrégation [43].

La déstabilisation des entités en suspension passe par des phénomènes d'adsorption [44], expliqués par la théorie de la double couche. Elle explique comment les colloïdes sont traités par coagulation.

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type des particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique. Ce temps va d'une seconde pour du gravier coagulé ayant un diamètre de 10 mm et une surface spécifique de  $6.10^2 \text{ m}^2. \text{m}^{-3}$ , à 20 ans pour du colloïde de  $10^{-2} \mu\text{m}$  ayant une surface spécifique de  $6.10^8 \text{ m}^2. \text{m}^{-3}$  [36]

#### II .3.1.1 Les Suspensions colloïdales – Nécessité de la coagulation

Dans le tableau II.1 sont répertoriés certains matériaux ou organismes avec leur dimension et l'ordre de grandeur du temps nécessaire pour que, sous la seule influence de leur poids, ces particules parcourent un mètre d'eau à 20 °C [45].

**Tableau II.1 :** Temps de décantation des différentes particules d'après la loi de STOKES

	Diamètre de particule		Type de particule	Temps de décantation pour 1 m d'eau	Surface spécifique $\text{m}^2. \text{m}^{-3}$
	mm	$\mu\text{m}$			
<b>MES décantables</b>	10	$10^4$	Gravier	1 seconde	$6.10^2$
	1	$10^3$	Sable	10 secondes	$6.10^3$
	$10^{-1}$	$10^2$	Sable	2 minutes	$6.10^4$
	$10^{-2}$	10	limon	2 heures	$6.10^5$
<b>colloïdes</b>	$10^{-2}$	10	Kyste de protozoaire	20 heures /	$6.10^5$
	$10^{-3}$	1	Argile	2 jours	$6.10^6$
	$10^{-3}$	1	Bactérie	8 jours	$6.10^6$
	$10^{-4}$	$10^{-2}$	Colloïde	2 ans	$6.10^7$
	$10^{-5}$	$10^{-2}$	Colloïde /	20 ans	$6.10^8$

Ce tableau indique également que plus la particule est petite, plus sa surface spécifique est grande.

Les colloïdes sont donc des particules impossibles à décanter naturellement, et pour lesquelles les phénomènes de surface sont primordiaux. Ces phénomènes régissent la stabilité des suspensions colloïdales. En effet, les colloïdes sont soumis à deux grands types de forces : [38]

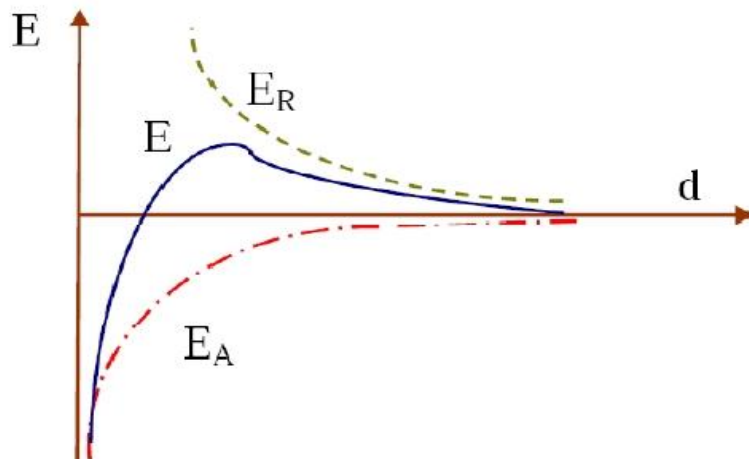
- **Force d'attraction de Van der Waals  $E_A$**  [46], Liée à la surface spécifique et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu.
- **Force de répulsion électrostatique  $E_R$** , liée aux charges superficielles des colloïdes, et donc à leur potentiel zêta ( $\zeta$ ) ou ( $\eta$ ) [46].

Si  $E_A > E_R$ , l'agrégation se produit [42]

Si  $E_R > E_A$ , il y a principalement la répulsion entre les particules colloïdales [47]

La stabilité d'une suspension colloïdale dépend du bilan des forces d'attraction et de répulsion, dont le niveau énergétique est donné par :  $E = E_A + E_R$

Quand deux particules similaires s'approchent l'une de l'autre il y a interaction entre leurs couches diffuses, cette interaction électrostatique produit toujours une force répulsive, une énergie potentielle répulsive,  $E_R$  apparaît et croît avec la diminution de la distance séparant les particules.



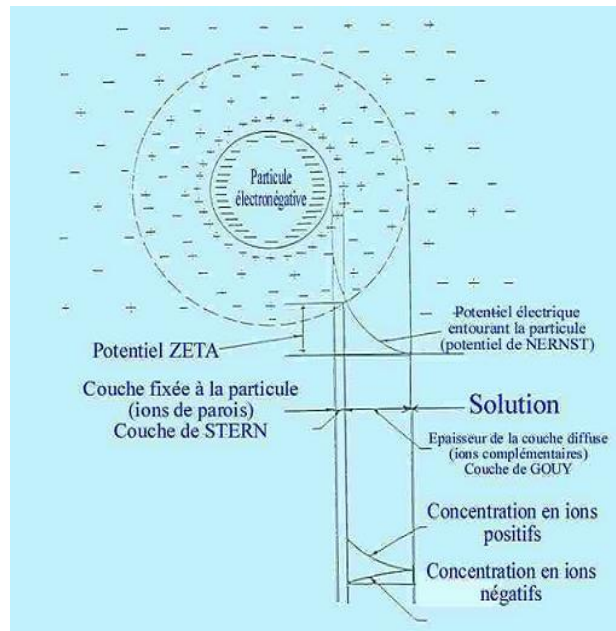
**Figure II.1** : Energie d'interaction entre deux particules lipophiles en fonction de la distance depuis la surface de la particule

### II .3.1.2 Théorie de la double couche

Les colloïdes présents dans l'eau brute sont généralement chargés négativement (imperfections -du réseau cristallin, ionisation des groupements chimiques périphériques,

...). Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs, présents dans l'eau brute ou ajoutés, viennent former une couche autour du colloïde. Diverses théories ont été avancées (Figure II.2) [38]

- **Théorie de HELMHOLTZ:** Une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche adhérente ou fixé).
- **Théorie de GOUM-CHAPMAN.** La couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde; la neutralité est obtenue à plus grande distance (couche diffuse).
- **Théorie de STERN** qui rassemble les deux précédentes et considère la formation d'une double couche. La première couche est adhérente au colloïde, le potentiel y décroît rapidement. La seconde couche est plus diffuse, avec une diminution plus lente du potentiel.



**Figure II.2:** La théorie de la double couche

### II .3.1.3 Potentiel Zêta

Le potentiel Zêta est responsable du comportement électrocinétique de la particule Colloïdale dû à la charge effective de l'ensemble particule-double couche. Quand la charge effective diminue, le potentiel Zêta et la stabilité diminuent.

Le potentiel qui existe entre la surface délimitant l'entité mobile et la surface extérieure de la couche diffuse, s'appelle potentiel Zêta.

Le potentiel Zêta est défini par l'équation :

$$\eta = \frac{4\pi\epsilon U}{D} \quad (\text{II.1})$$

$\mu$  : viscosité dynamique du liquide ( $\text{Kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) ;

$U$  : mobilité de la particule (m/s) ;

$D$  : constante diélectrique du milieu.

Pour une particule hydrophobe, ce potentiel est de l'ordre de 50 à 100 mv.

Le potentiel électrostatique est influencé par la force ionique  $I$  de l'eau.

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i \times Z_i \quad (\text{II.2})$$

$I$  : Force ionique (mole/l) ;

$C_i$  : Concentration de l'ion  $i$  (mole/l) ;

$Z_i$  : Valence de l'ion  $i$ .

Une augmentation de la force ionique comprime la couche diffuse vers la particule se qui réduit le potentiel Zêta des particules hydrophobes. Pour les particules hydrophiles il faut plutôt agir sur la couche d'eau liée lorsqu'on veut favoriser leur agglomération [42].

#### II .3.1.4 La Théorie chimique

Les énergies de liaisons covalentes étant de 20 à 50 fois supérieures aux énergies électrostatiques, une "théorie chimique" a été également introduite pour interpréter la déstabilisation des suspensions colloïdales. Ce modèle considère que la charge primaire d'une particule colloïdale est due à l'ionisation directe des groupements chimiques présents à sa surface (hydroxyles, carboxyles, phosphates, sulfates,...).

La déstabilisation se réalise par réaction covalente entre ces groupes et les ions métalliques polyvalents des coagulants.

Cette théorie montre que la précipitation simultanée d'hydroxydes métalliques et le pontage inter particulaire sont des phénomènes importants dans la coagulation [38].

### II .4 Mécanisme de la Coagulation-Floculation

#### II .4.1 La Coagulation

Les particules colloïdales présentes dans les eaux naturelles ne peuvent pas sédimenter en raison de leur faible dimension. Elles ne peuvent pas s'agglomérer puisqu'elles sont chargées négativement et que les forces électriques de répulsion prédominent sur les forces d'attraction. Pour vaincre l'énergie d'interaction entre les particules colloïdales, il existe deux possibilités: la diminution du potentiel zêta, en ajoutant des réactifs minéraux contenant des cations multivalents qui seront adsorbés au

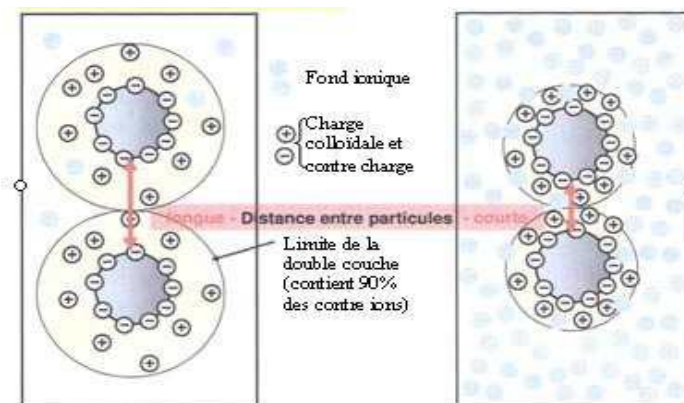
niveau de la surface colloïdale. Il va y avoir donc une neutralisation de charge électrique, appelée généralement coagulation;

On distingue ainsi quatre mécanismes de base pour la déstabilisation des particules colloïdales [48]:

Compression de la double couche (coagulation électrostatique); adsorption et neutralisation des charges; emprisonnement des particules dans un précipité; adsorption et pontage.

### ➤ Compression de la double couche (coagulation électrostatique)

L'addition de l'électrolyte va augmenter la densité de charge dans la couche diffuse en favorisant sa contraction. L'effet de cette contraction consiste à changer la distribution des forces répulsives de la double couche au sein du colloïde, entraînant une réduction de la surface potentielle avec l'augmentation de la concentration de l'électrolyte, ce qui permet aux forces attractives de van der Waal's de devenir plus dominantes, favorisant ainsi l'agrégation des particules, toutefois ; la théorie de la compression de la double couche n'explique pas à elle seule tous les phénomènes observés lors de la déstabilisation des particules lorsqu'on augmente la quantité de coagulant, phénomène qu'on ne peut pas expliquer à l'aide de la théorie de la compression de la couche double.[48].



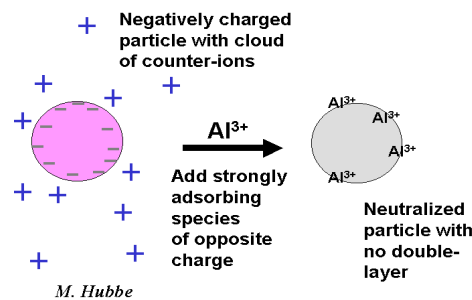
**Figure II.3:** Représentation schématique de la compression de la couche diffuse

### ➤ Adsorption et neutralisation des charges

Dans ce mécanisme, Certaines espèces chimiques de charges opposées sont adsorbées par la surface résultant de la réduction de l'étendue de la double couche interaction répulsive entre autres des particules colloïdales [49]. La déstabilisation par adsorption diffère de la déstabilisation par compression de la double couche parce que les espèces adsorbables sont capables de déstabiliser les colloïdes à un dosage beaucoup plus

faible que les espèces non adsorbables. Ainsi, la déstabilisation par adsorption est stœchiométrique. La quantité de l'électrolyte nécessaire pour la coagulation par compression de double couche n'est pas stœchiométrique et elle est pratiquement indépendante de la concentration du colloïde, aussi il est possible qu'une surdose d'une espèce adsorbable cause une déstabilisation par inversement de charge des particules colloïdales,

Le fait que les ions peuvent être adsorbés au-delà du point de neutralisation de charge jusqu'à un inversement de charge peut être expliqué par une prédominance des interactions chimiques sur les effets de répulsion électrostatique dans certains cas [48]

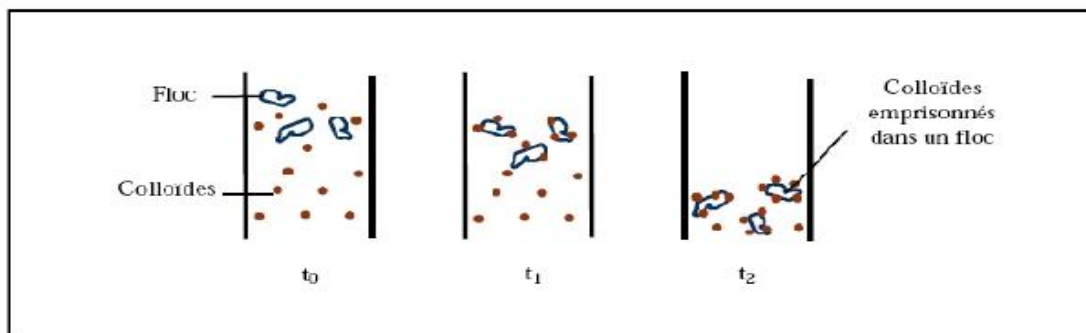


**Figure II.4:** Représentation schématique de l'adsorption et neutralisation des charges

### ➤ Emprisonnement des particules dans un précipité

Pour déstabiliser les particules colloïdales, on peut en outre les emprisonner dans une particule de floc, l'ajout de coagulant qui sont des sels métalliques trivalents ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ou  $\text{FeCl}_3$ ) permet d'obtenir un précipité nommé floc ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) à pH neutre ou acide. Le floc formé emprisonnerait les particules négatives et les entraînerait durant l'étape de décantation [50].

Ce processus n'est plus stœchiométrique et ne dépend plus de la charge du coagulant [51]



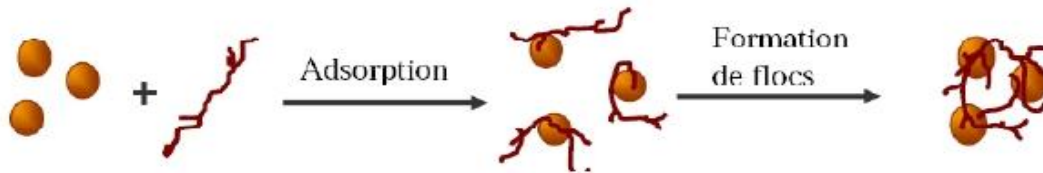
**Figure II.5:** Emprisonnement des particules dans les floes pendant la décantation.

### ➤ Adsorption et pontage

Plusieurs composés naturels comme l'amidon, la cellulose, les polysaccharides et les protéines, ainsi qu'une large variété de polymères synthétiques sont connus pour leurs propriétés coagulantes. Ces produits sont caractérisés par leur grande masse moléculaire et, de plus, ont de multiples charges électriques tout au long de leurs chaînes d'atomes [48].

L'utilisation des polymères anioniques, cationiques ou non ioniques possédant une masse moléculaire élevée et une longue chaîne, et sont capables de déstabiliser les particules colloïdales chargées négativement.

Plusieurs chercheurs ont développé une théorie des ponts chimiques qui est valable pour expliquer le comportement observé de ces composés polymériques. [52], [53].



**Figure II.6:** Adsorption et pontage à l'aide d'un polymère

Le phénomène est décrit par la formation des ponts entre les particules colloïdales par l'intermédiaire des molécules des polymères. Il peut y avoir déstabilisation de la suspension ; dans ces conditions, les sites libres de plusieurs molécules de polymères s'accrochent à une même particule colloïdale. La fixation des polymères sur la particule peut résulter d'une attraction coulombienne, des liaisons d'hydrogène, des forces de van der Waals ou d'échanges d'ions. [48]

## II .4.2 La Flocculation

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres ce qui conduit à la croissance en taille du floc et à la diminution en nombre des particules en solution [42]. La flocculation peut être provoquée par trois mécanismes :

### ➤ Flocculation péri cinétique

Les contacts entre les particules sont causés par le mouvement aléatoire de celles-ci, dit mouvement brownien [54], la vitesse de flocculation ou variation du nombre de particules au cours du temps est donnée par l'équation suivante [38]:

$$\frac{dN}{dt} = \alpha \frac{4KT}{3\mu} N^2 \quad (\text{II. 3})$$

Où N : nombre de particules par unité de volume

$\alpha$  : Fraction des chocs efficaces

k : Constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$ )

T : Température absolue (K)

$\mu$  : Viscosité dynamique de l'eau (Pa.s)

Après intégration on obtient le temps de demi-vie [54].

$$t_{1/2} = \frac{3\mu}{4KT\alpha N_0} \quad (\text{II. 4})$$

Son importance est limitée dès que le diamètre des particules ou des micro-flocs dépasse le micron [55].

### ➤ Floculation ortho cinétique

La floculation provoquée par l'agitation de l'eau, l'agitation facilite l'agrégation en augmentant la probabilité des collisions entre les particules, la vitesse du fluide varie dans l'espace et dans le temps [38].

	Régime laminaire	Régime turbulent
$\frac{dN}{dt}$	$\frac{1}{6} \alpha N^2 G^0 d^3$	$KN^2 G^0 d^3$

$G^0$  : est un gradient de vitesse, il n'est définissable qu'en régime laminaire

$$G^0 = \frac{dv}{dz} \quad (\text{II.5})$$

On peut aussi définir le gradient de vitesse par :

$$G = \sqrt{\frac{P}{V}} = k \sqrt{\frac{P}{V}} \quad (\text{II.6})$$

P : puissance réellement dissipée (w)

V : volume occupé par le fluide ( $\text{m}^3$ )

➤ Le mouvement relatif des particules dû à la différence de densité entre les particules (cas de la sédimentation).

Pour mieux illustrer ceci, la figure II.6 résume les différents phénomènes de la coagulation-floculation produits par un polymère [56].



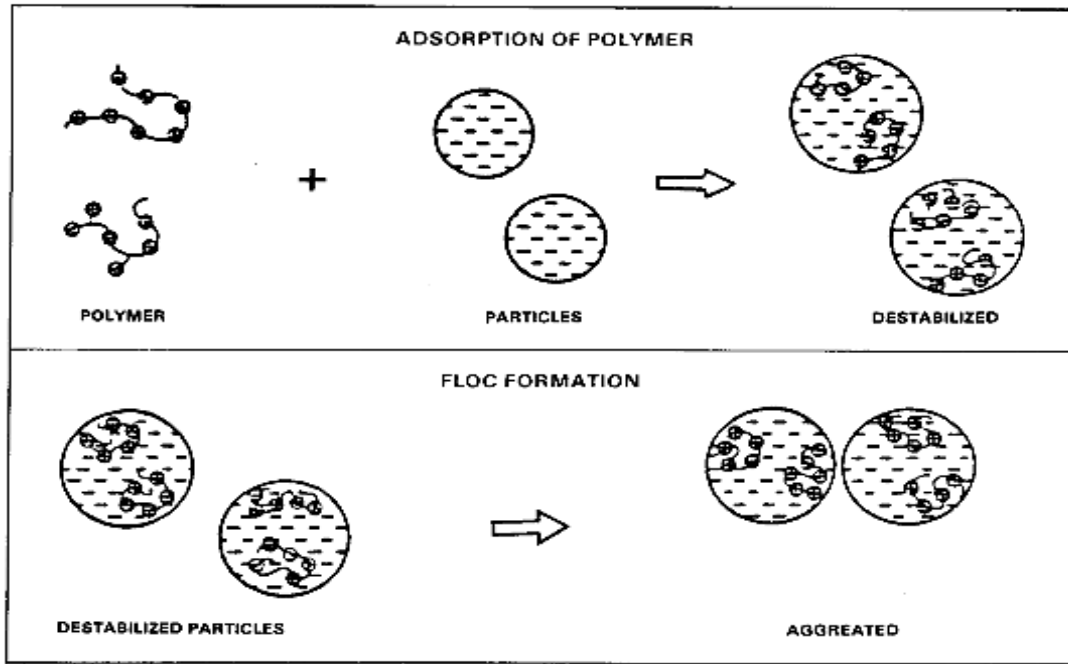


Figure II.7 : processus de formation floc

#### II .4.3 Facteurs influençant la coagulation

Nous allons énumérer l'ensemble des paramètres influençant le bon fonctionnement du procédé de coagulation.

##### a) L'Influence du paramètre pH

Le pH est un des paramètres qui affecte beaucoup plus la coagulation-floculation. Son contrôle est donc conseillé. Selon les caractéristiques d'une eau, il existe un pH optimal permettant la meilleure coagulation [57]. Ce pH se situe souvent dans la plage où la solubilité du coagulant utilisé est minimale, ce qui donne une meilleure précipitation. Le contrôle du pH permet aussi d'améliorer la coagulation lorsque la température de l'eau est faible

##### b) L'Influence de la dose de coagulant

La dose de réactif est un paramètre à prendre en compte. Le coagulant qui est habituellement fortement acide a tendance à abaisser le pH de l'eau, une dose de coagulant excessive entraîne une augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité de l'eau traitée insuffisante.

La détermination du taux de coagulant est effectuée par analyse hors ligne au laboratoire tous les jours, à l'aide d'un essai expérimental appelé « Jar-test » [58], [59]

**c) L’Influence de la température**

Plusieurs études ont montré l'effet de la température sur la coagulation floculation [60], [61], [62], [63], [64], une température basse, entraînant une augmentation de la viscosité de l'eau ralentit la décantation des floes avec faible solubilité des coagulants,

Plusieurs recherches ont montré que la plage du pH optimal varie avec la température de l'eau [65].

Nous savons qu'une baisse de la température ralentit la cinétique des réactions chimiques. L'équation d'Arrhenius décrit bien l'effet de la température sur les constantes cinétiques [66]. Une baisse de température se traduit par une réduction de la constante de vitesse k :

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (\text{II.7})$$

Où A : constante de réaction propre aux produits concernés

$E_a$  : énergie d'activation

R : constante des gaz parfaits.

T : température

Pour éviter ces difficultés, une solution consiste à changer de coagulant en fonction des saisons. [59].

**d) L’Influence de la turbidité**

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

Quand la turbidité de l'eau est trop faible, on peut augmenter la concentration en particules par addition d'argiles. Dans le cas de fortes pluies, l'augmentation des MES favorise une meilleure décantation. Enfin, pour grossir et alourdir le floc, on ajoute un adjuvant de floculation [58], [59].

**e) L’Influence de la Valence des colloïdes**

Selon la nature des particules colloïdales et leur interaction vers le milieu aqueux, c'est à dire leur facilité d'échange des cations périphériques selon qu'elle s'avère forte ou faible, elle favorise plus ou moins le processus de coagulation.

**f) L'Influence de la grosseurs et concentration des particules colloïdales**

Il existe un seuil propice, pour la coagulation, du point du vue dimensionnel. Pour les particules dont les dimensions sont inférieures au micron, les forces de surface deviennent prépondérantes vis-à-vis des forces de masse. Dans ces conditions, on constate un état de dispersion stable du aux effets conjugués du mouvement brownien [67].

De même, il s'avère que la concentration des particules ; c'est-à-dire le nombre de charges électriques à mettre en jeu pour rompre le potentiel zêta, a une grande influence sur la coagulation. Cette coagulation est très difficile quand la concentration colloïdale est basse, sachant que le taux de contact interarticulaire se trouve probablement baissé.

**g) Vitesses et temps d'agitation**

Lors de l'introduction du coagulant dans l'eau, on procède à une agitation rapide pour la dispersion et l'homogénéisation de la solution. Mais une agitation intense empêche l'agrégation des particules, tandis qu'une agitation prolongée, permet l'effraction des liaisons entre coagulant et la surface des particules, et le rabattement ultérieur des segments étendus sur la surface des particules.

**h) Effets de l'alcalinité**

L'alcalinité naturelle de l'eau réagit avec l'alun pour former le précipité d'hydroxyde d'aluminium. Il faut donc un minimum d'alcalinité pour que l'alun agisse correctement. Ce minimum permet aussi de stabiliser le pH dans la plage optimale au cours de la coagulation [57]. Dans les eaux de faibles alcalinités, des coagulants préhydrolysés peuvent s'avérer avantageux car ils consomment moins d'alcalinité.

**i) Electrifications des particules**

Toutes les particules sont ionisées [67], la charge électrique agit par la modification de la tension superficielle si cette tension est positive, les particules s'agglomèrent ; si elle est négative, les particules se dispersent [68].

**j) Etat d'hydratation**

L'hydratation est un phénomène complexe dont les effets se répercutent sur le taux d'agrégation des colloïdes.

Dans une solution aqueuse, les particules microscopiques s'hydratent et s'enveloppent de

liquide, cette monocouche d'eau absorbée chimiquement sur les surfaces des particules (ex : les oxydes métalliques, les argiles,...).

### k) Potentiel Zeta

Ce potentiel a une valeur maximale à la surface de la particule et décroît avec la distance à partir de la surface, cette décroissance est affectée par les caractéristiques de la couche diffuse, ainsi que par le nombre et le type des ions dans la solution chargée [69].

Les effets de charge sur la stabilité apparente des colloïdes irréversibles doivent être déterminés par la somme des énergies attractive et répulsive de l'interaction ( $E_R + E_A$ ) [70].

Le taux de coagulation dépend de la grandeur de la barrière d'énergie cinétique qui anime les particules colloïdales.

Les systèmes colloïdaux qui ont une grande énergie d'activation et une faible énergie cinétique coagulent très lentement (colloïdes persistant) par contre les colloïdes avec une faible énergie d'activation et/ou une grande énergie cinétique coagulent rapidement systèmes caducs [70].

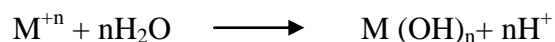
## II .5 Types des coagulants et floculants

Plusieurs coagulants et floculants quelques soit leurs d'origine, peuvent être employés dans le procédé de coagulation-floculation.

### II .5.1 Les coagulants minéraux

Les coagulants principalement utilisés pour déstabiliser les particules colloïdales sont à base de sels d'aluminium ou de fer hydrolysable; ces coagulants, une fois introduits dans l'eau, forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation,

La réaction de base lors de la mise en solution des coagulants minéraux est une hydrolyse qui modifie les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter :

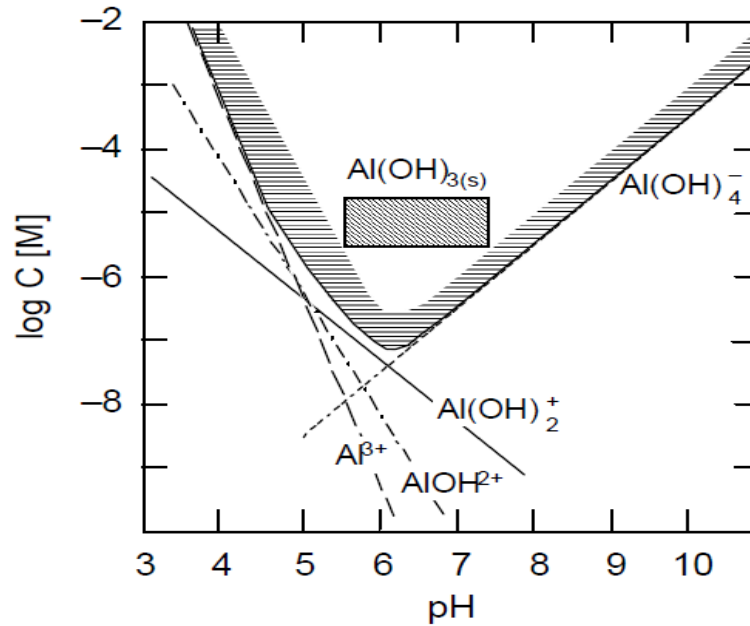


#### II .5.1.1 Les sels d'aluminium

La coagulation par les sels à base d'aluminium sont généralement effectués à une gamme de pH entre 6.0 et 7.5.

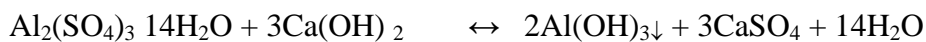
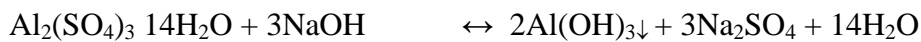
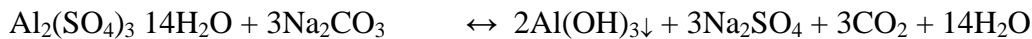
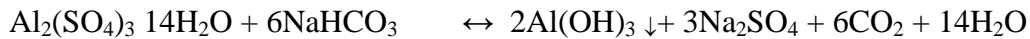
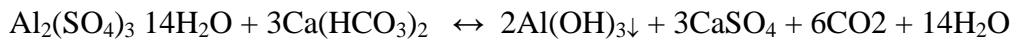
En Algérie, Le sel métallique le plus utilisé est le sulfate d'aluminium (alun)  $Al_2(SO_4)_3$ , plusieurs radicaux hydroxy-alumineux monomères ou polymères sont formés [71].ces

produits complexes ont une solubilité qui varie avec le pH.



**Figure II.8** : Diagramme de solubilité dans l'eau de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  à  $25^\circ\text{C}$

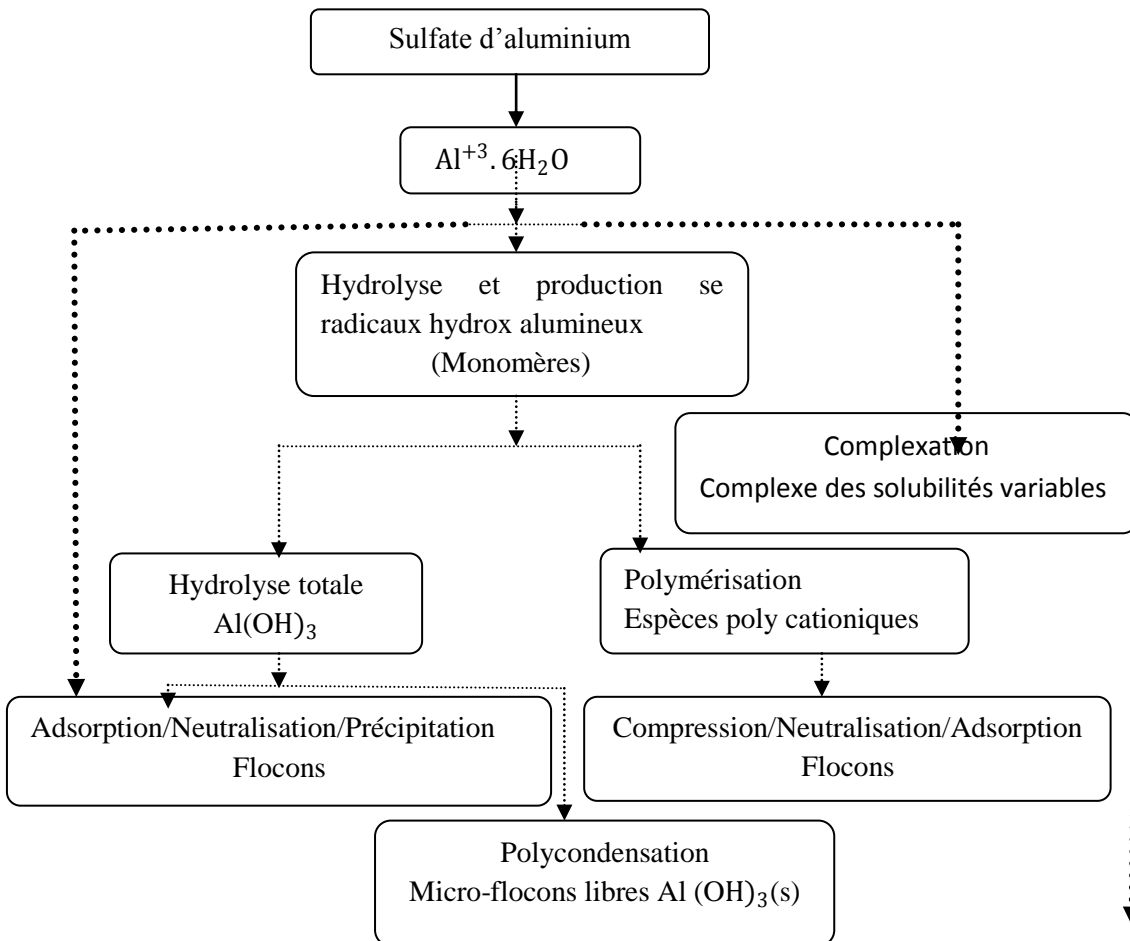
Dans le cas de l'alun. Les réactions suivantes décrivent comment est formé le précipité [72]:



L'hydrolyse de l'alun se traduit par la formation d'espèces différentes susceptibles d'intervenir dans la coagulation. Ces espèces interviennent selon différents mécanismes tels que représentés dans la figure II.9 [73].

Ce schéma décrit les quatre différents mécanismes de la coagulation. En effet, l'hydrolyse de l'alun permet de former des radicaux hydroxy-alumineux (monomères) qui à leur tour forment le précipité  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou des espèces poly-cationiques. Les espèces poly-cationiques agissent sur les particules colloïdales par compression, neutralisation et adsorption ce qui permet la formation des floccs. La formation des précipités  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , voie

principale en coagulation, implique des doses élevées d'alun et favorise l'emprisonnement des particules dans un précipité. Parallèlement à la formation des radicaux hydroxy-alumineux, il y a complexation avec des ligands contenus dans l'eau s'ils sont en quantité suffisante. Le degré de complexation varie en fonction du pH. La complexation avec des ligands expliquerait, dans plusieurs cas, la présence d'aluminium résiduel dans l'eau décantée.



**Figure II.9:** Mécanismes et produits dérivés du sulfate d'aluminium lors de la coagulation

Il existe d'autres sels d'aluminium utilisés dans le traitement des eaux qui sont :

➤ **Oxyde de Calcium - CaO (lime)**

Il produit du carbonate de calcium dans l'eau usée et permet ainsi la coagulation des matières particulaires et de certains métaux. Il est généralement utilisé avec d'autres coagulants puisque de très grandes quantités de CaO sont souvent nécessaires lorsqu'il est utilisé seul. De plus, il génère typiquement plus de boues que les autres coagulants [38]

- **Oxyde de calcium CaO (lime)** (liqueur à base d'eau de mer à pH élevé)

Une étude réalisée[38], montre que l'utilisation de l'oxyde de calcium en combinaison avec une liqueur à base d'eau de mer dans des conditions de pH élevé offre d'intéressants résultats au niveau du procédé de coagulation, le système de traitement utilisant ce type de coagulant est flexible au niveau de l'effluent à traiter et facile à opérer, Il est très efficace pour enlever les MES, le phosphore total et les métaux, avec génération importantes des quantités des boues

- **Le chlorure d'aluminium** :  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

C'est un produit efficace mais dont l'emploi est réservé à des cas particuliers [38].

- **L'aluminate de soude** :  $\text{NaAlO}_2$ .

- **Polychloro sulfate basique d'aluminium**:  $\text{Al}_n (\text{OH})_m \text{Cl}_{3n-m-2p} (\text{SO}_4)_p$

Ils sont moins acides que les sels d'aluminium classiques. Leur stabilité est souvent assurée par la présence d'ions sulfates qui inhibent la polymérisation spontanée du produit. Leur utilisation conduit souvent à un taux de traitement inférieur à celui du sulfate d'aluminium (exprimé en  $\text{Al}^{3+}$ ). La cohésion des boues est généralement meilleure, mais un adjuvant de floculation demeure souvent nécessaire [38]

- **Polyalumino-silico-sulfate (pass)** :  $(\text{Al}_a (\text{OH})_b (\text{SO}_4)_c (\text{SiOx})_d)_n$

Ce dernier coagulant est plus avantageux pour les eaux dont le pH et la turbidité sont faibles et en particulier à basse température [74].

### II .5.1.2 Les sels ferriques

Les précipités à base de fer sont formés de la même façon. Ils forment la base des floccs qui emprisonnent les particules colloïdales, pour que la coagulation par les sels ferriques s'effectué correctement, il faut que le pH soit supérieur à 5.5 ou 6.

Les sels du fer sont généralement plus couteux que le sulfate d'aluminium, ce qui explique leur emploi plus restreint. il faut néanmoins les considérer dans le cas d'eaux brutes pauvres en alcalinité et fortes en couleurs ou dans des circonstances exigeant une coagulation à pH très élevé [57].

Les sels de fer utilisés dans le traitement des eaux sont :

- **Chlorure ferrique**  $\text{FeCl}_3$
- **Sel double (Chlorosulfate ferreux)**  $\text{FeClSO}_4$
- **Sulfate ferrique**  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
- **Sulfate ferreux**  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Il est généralement utilisé avec le Cao pour réduire la dureté de l'eau. La combinaison des deux coagulants génère du sulfate de calcium et de l'hydroxyde ferrique. L'eau usée doit cependant contenir de l'oxygène dissout afin que la réaction puisse prendre place [38].

L'efficacité de ces coagulants avec ou sans aide coagulant, selon le pH et la température de l'eau.

Le tableau II.2 montre clairement les caractéristiques de quelques coagulants minéraux

**Tableau II.2:** Caractéristique de quelques coagulants minéraux

	Nom commercial	Masse molaire	Densité	Forme	Formule	Apport en $\text{M}_2\text{O}_3$	remarques
<b>Sels d'Aluminium</b>	Sulfate d'aluminium	666	-	Solide	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	17à18	Poudre irritante
	Sulfate d'aluminium	645	1.45	liquide		8.2	Liquide corrositif
	Polychlorosulfate Basique d'aluminium	-	1.2	liquide	$\text{Al}_n(\text{OH})_m \text{Cl}_{3n-m-2p}(\text{SO}_4)_p$	10	Réactif acide dénommé WAC
<b>Sels de Fer</b>	Chlorure ferrique	162.5	1.45	liquide	$\text{FeCl}_3$	41%Fe	Réactif acide
	Sulfate ferreux	278	-	liquide	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	20%Fe	
	Chlorosulfate ferreux	187	1.5	liquide	$\text{FeClSO}_4$	14%Fe	Réactif acide

### II .5.2 Les coagulant naturels

Comme l'ont relevé certaines études, les coagulants à base d'aluminium, de fer et même les polymères synthétiques présentent un désavantage important : leur toxicité probante pour l'environnement. Cela a donc poussé quelques chercheurs à investiguer la



possibilité d'utiliser des composés d'origine naturelle pour réaliser le procédé de coagulation-floculation [75].

La plupart des coagulants d'origine végétale ne sont pas réalisables en raison du cout et de la disponibilité dans le monde, donc difficile à mettre en œuvre pour le traitement de l'eau. En outre la disponibilité tout au long de l'année est un facteur important à prendre en considération.

L'utilisation des coagulants naturels a été découragée dans les pays développés sous prétexte qu'ils n'ont jamais été soumis à une évaluation scientifique rigoureuse [76]. Dans les pays en voie de développement, leur développement s'est poursuivi si bien qu'aujourd'hui les pays développés recommencent à s'intéresser à cette alternative [77]. Traditionnellement, les coagulants naturels d'origine végétale ont été utilisés au niveau des ménages. Les femmes dans les zones rurales du Soudan [78], traitent leurs eaux avec de la poudre de graines de Maringá oleifera avant l'utiliser comme eau potable.

### II .5.1.1 Extrait de graines de Morinaga oleifera

La coagulation par le Maringá oleifera est développée à la cour des Années passées et le plus utilisable dans le traitement des eaux usées et les eaux destinées à la consommation; Des essais de la coagulation sur une plante tropicale appartenant à la famille des Maringaceae, ont donné un coagulant qui a une propriété forte intéressante. Il existe une quarantaine de variétés de cette plante, certaines affichant de meilleures performances dans le traitement des eaux usées [75]. Plusieurs études montrent que cet extrait de plante offre de bons rendements pour réduire la turbidité, la présence des microorganismes, la dureté de l'eau et enfin pour le conditionnement des boues. La molécule active responsable des propriétés coagulantes est une protéine cationique.



**Figure II.10** : Vue de Maringá oleifera

Plusieurs avantages hors d'utilisation de Maringá oleifera :

- N'affecte pas significativement le pH, la conductivité, l'alcalinité, la concentration des ions, sauf pour les nitrates et les ortho phosphates qui voient leurs concentrations augmenter durant la réaction;
- Comparée à l'alun, l'extrait de graine n'affecte pas le pH, il est donc moins corrosif;
- Le volume de boues produites est moins grand qu'avec l'alun et ces boues ne sont pas toxiques, elles peuvent donc être valorisées facilement;
- Le coût d'utilisation est beaucoup plus bas que les traitements chimiques. C'est donc une alternative envisageable tant pour les pays en voie de développement que pour les pays développés.

Mais ils y ont des inconvénients:

- L'extrait aqueux provenant des graines augmente considérablement la quantité de matière organique dans l'eau usée, ce qui cause des problèmes d'odeurs, de couleurs et de goût lorsque l'eau est stockée plus de 24 h. Il est donc recommandé d'utiliser un extrait contenant la protéine active uniquement pour traiter une eau qui sera consommée.
- Le développement de la technologie doit se faire à grande échelle pour que le coût de l'extraction de la protéine active soit abordable.

### **II .5.1.2 Autres coagulants naturels**

Plusieurs Chercheurs Ont testé autres coagulants d'origine végétale telles que:

Cactus [79], Algal alginate [80], Chestnut et Acorn [81], Haricot commun [82], les graines Nirmali (Strychnos potatorum) [83], [84], Tanins [85], [86], Jatropha curcas seeds [87], [88], Banana [89].



**Figure II.11:** Vue des quelques coagulants naturels

### II .5.1.3 Caractérisation des coagulants naturels

Une analyse élémentaire (Tableau II.3) était menée à fournir une comparaison entre la composition élémentaire entre de quelques coagulants d'origine végétales.

**Tableau II.3:** analyse élémentaire des quelques coagulant naturels

Paramètres	Shelled Moringa seeds [90]	Nonshelled Moringa seeds [90]	Cactus opuntia [91]	Banana stem (pseudostem) [92]
C%	54.8	53.3	29.4	36.83
N%	6.1	5.5	2.3	5.19
H%	8.5	7.7	1.7	0.93

### II .5.3 Aides-coagulants (adjuvant de floculation)

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

#### II .5.3.1 Les Flocculants minéraux

Les adjuvants minéraux les plus utilisés sont la silice activée. Ils agissent par adsorption et pontage entre les particules colloïdales.

La silice activée est un des premiers aides-coagulants utilisés. Son coût est faible et elle est efficace en eau froide lorsqu'elle est combinée avec le sulfate d'aluminium. Elle est produite à partir d'une solution de silicate de sodium à laquelle on ajoute un réactif pour l'activation qui résulte en la formation d'un gel [93]. La silice est souvent activée par neutralisation à l'aide d'un acide, soit l'acide sulfurique ou le chlore gazeux.

#### II .5.3.2 Les Flocculants naturels

Les flocculants organiques naturels sont des polymères hydrosolubles d'origine animale ou végétale. Généralement non ioniques, ils peuvent être modifiés chimiquement, les plus utilisés sont les amidons, les alginates.

Les alginates de sodium sont extraits de l'acide alginique, un composé provenant d'algues marines. Ces produits sont particulièrement employés en combinaison avec les sels ferriques, mais peuvent donner de bons résultats avec les sels d'aluminium.

Les amidons sont Obtenus de la pomme de terre, du tapioca ou d'autres végétaux, ces polymères de glucopyranose non linéaires ramifiés sont utilisés de préférence avec les sels d'aluminium.

Il ya d'autre composés naturels ont des propriétés flocculats tel que cellulose, gommés, tanins, xanthanes, mais ils sont très peu utilisés dans le traitement des eaux [38].

Des études documentent l'utilisation d'une gomme faite à base de graines d'*Ipomoea dasysperma* [94], *Cassia javahikai* [95], *Cactus* [92] comme agent coagulant.

### II .5.4 Les coagulants et flocculants organiques synthétiques [38]. [96]

Actuellement, trois principales familles des polymères organiques cationiques de synthèse, utilisés en coagulation, elles sont de forte charge cationique et poids moléculaire relativement bas (104 à 105) g/mol;

- mélamine formaldéhyde (ou mélamine formol) ;
- Epichlorhydrine diméthylamine (EPI.DMA) ;
- poly (chlorure de diallyldiméthyl-ammonium) (POLYDADMAC).

Les floculants organiques synthétiques sont de très haut poids moléculaire ( $10^6$  à  $10^7$ ) g/mol, et charge ionique très variable, obtenus par association de monomères synthétiques,

Dont les principaux sont les :

- Polymère anionique : copolymères de l'acrylamide et de l'acide acrylique ;
- Polymère neutre ou no ionique : polyacrylamides ;
- Polymère cationique : copolymères d'acrylamide et d'un monomère cationique.

Les paramètres qui affectent le plus le rendement de ce genre de coagulant sont le pH et la dose utilisée.

## **II .5.5 Choix du coagulant**

L'efficacité de la clarification dépend d'abord du coagulant utilisé. Les coagulants sont des produits qui neutralisent les charges de surface des matières colloïdales [97]

Le choix du coagulant pour le traitement de l'eau de consommation doit tenir compte de l'innocuité du produit, de son efficacité et de son coût. Le type de coagulant et la dose ont une influence sur :

- La bonne ou la mauvaise qualité de l'eau clarifiée.
- Le bon ou le mauvais fonctionnement de la floculation et de la filtration.
- Le coût d'exploitation.

# CHAPITRE III

## PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

# CHAPITRE IV

## RÉSULTATS ET DICUSSION

## CHAPITRE V

### MODÉLISATION DE LA DOSE DU COAGULANT

#### V .1 Introduction

La coagulation est l'une des procédés les plus importantes en traitement des eaux de surface [113]. La principale difficulté rencontrée lors de l'opération de ce procédé est de déterminer la quantité optimale de coagulant à ajouter pour l'atteinte des objectifs visés par cette étape de traitement. Ce dosage peut-être corrélé de façon non-linéaire aux caractéristiques de l'eau brute à traiter [113], [114]. Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle de connaissance permettant d'exprimer les phénomènes physiques et chimiques mis en jeu. La seule solution pour l'établissement de ce modèle c'est d'avoir recours à une modélisation de type comportemental.

Cette modélisation s'appuie sur la méthodologie de plan d'expérience, en utilisant le logiciel de Minitab.

#### V .2 Procédure expérimentale

Pour acquérir les données, des essais de coagulation ont été lancés chaque fois que les caractéristiques d'eau brute de station Oued El Athmania se modifiaient. Chacun de ces essais a été complété par des analyses physico-chimiques.

##### V.2.1 Solutions du coagulant

Au cours de nos essais, nous avons utilisé comme réactif coagulant le sulfate d'aluminium ( $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$ ).



## V.2.2 Choix des paramètres

L'étude des articles publiés sur la coagulation par le sulfate d'aluminium montre que nombreux facteurs ont été influencés sur le taux du coagulant tels que la turbidité, le pH, la température, la conductivité, la matière organique et le TAC [114], [115]. Après les données statistiques de caractéristiques des eaux brutes de station d'Oued El Athmania pour une durée d'une année, les paramètres les plus variées sont : la turbidité, le pH et la température.

Le Tableau V.1 représente la répartition statistique des données dans le domaine expérimental étudié.

**Tableau V.1** : Répartition statistique des données dans le domaine expérimental étudié

variables	Unités	Minimum	Maximum	Centre	Moyenne	Ecart-type	Coefficient Variation
<b>Turbidité</b>	NTU	4	24	14	10.6	4.07	0.8
<b>pH</b>	/	7.70	8.55	8.125	8.15	0.22	0.03
<b>Température</b>	C°	6.4	22	14.2	12.8	4.96	0.39
<b>Dose sulfate d'aluminium</b>	mg/l	20	45	32.5	27.5	4.59	0.17

## V.3 Résultats et Discussion

### V.3.1 Plant factoriel complet

#### V.3.1.1 Construction du plant factoriel complet

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel. Le nombre d'essais N se calcule d'après la formule suivante :  $N = 2^k$  où k est le nombre de facteurs (k=3).

Dans ce but, nous avons établi un diagramme de cause-effet et ce pour estimer l'influence des paramètres tels que la turbidité, le pH et la température sur le taux de coagulant.

On commence par un plan factoriel classique du premier degré.

La construction d'un plan complet à 3 facteurs s'effectue par le modèle suivant :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i * x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2 \\ i \neq j}}^3 a_{ij} * x_i * x_j \quad (\text{V}.1)$$

Avec

Y : réponse du modèle

$a_i$  : Coefficients du modèle

$x_i$  : Variables du modèle

Les variables  $x_i$  sont réduites, c'est à dire adimensionnelles et de faible amplitude (elles varient entre - 1 et + 1). Ce choix de codage permet de comparer directement l'influence des descripteurs sur la réponse.

La transformation d'une variable réelle  $U_i$  en variable codée  $x_i$  s'obtient à partir de la relation suivante :

$$x_i = (U_i - U_{i0})/\Delta U \quad (\text{V}.2)$$

Si  $U_{sup}$  et  $U_{inf}$  représentent respectivement les limites supérieures et inférieures de variation d'un descripteur alors :

$$U_{i0} = (U_{sup} + U_{inf})/2 \quad (\text{V}.3)$$

$$\Delta U = (U_{sup} - U_{inf})/2 \quad (\text{V}.4)$$

$U_{i0}$  Représente la variable réelle au centre du domaine expérimental et  $\Delta U$ , l'écart maximal.

### V.3.1.2 Caractéristiques du problème

Le tableau V.2 montre clairement les caractéristiques de ce problème avec un nombre d'expériences de 8 expériences.

**Tableau V.2:** Caractéristiques du problème

Objectif de l'étude	Etude des effets
Nombre de variables	3
Nombre d'expériences	8
Nombre des coefficients	8
Nombre de réponses	1

Le calcul a conduit au modèle suivant (exprimé en variables réduites)

$$DOSE = 34.375 + 6.875 * TU + 1.875 * pH - 3.125 * T - 0.625 * TU * pH + 1.875 * TU * T - 0.625 * pH * T - 0.625 * TU * pH * T \quad (V.5)$$

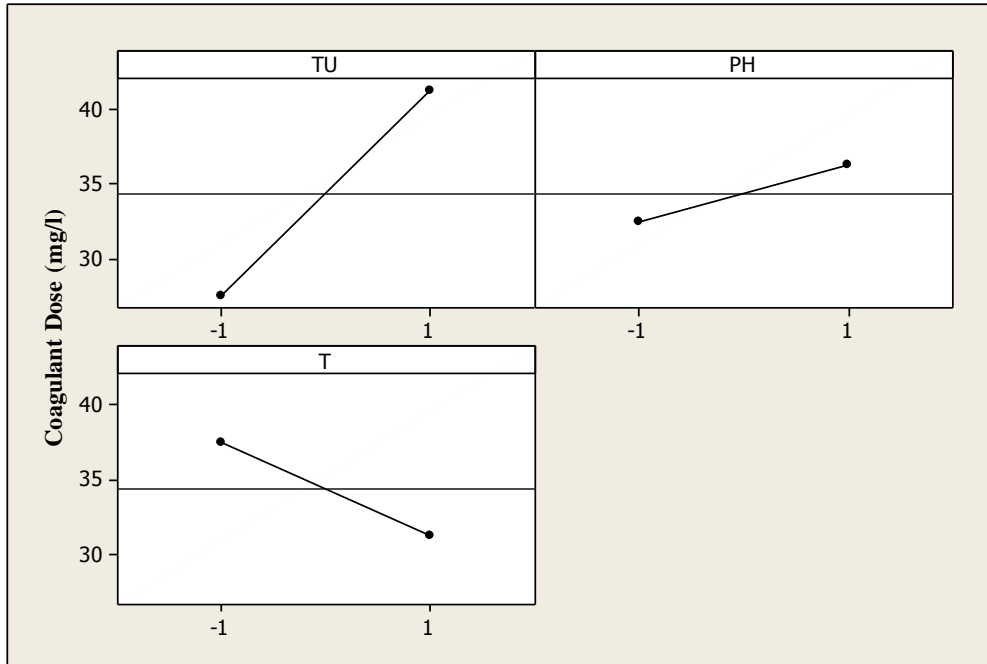


Figure V.1 : Diagramme des effets

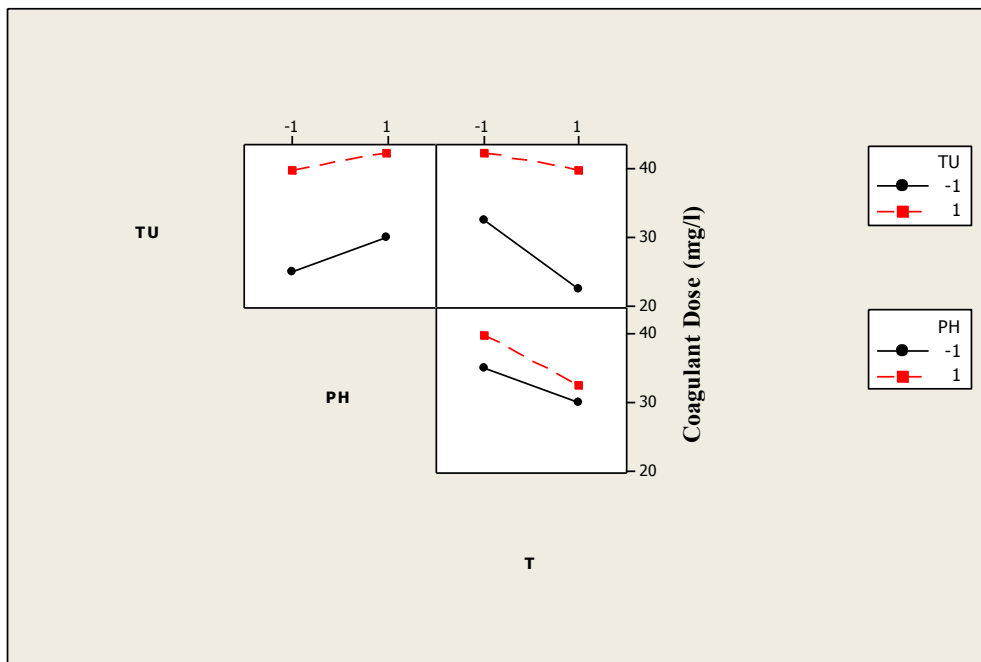


Figure V.2 : Diagramme des interactions

La figure V.1 montre clairement que tous les paramètres considérés : la turbidité, le pH et la température sont influençant sur le procédé de coagulation ; l'augmentation de la turbidité et même le pH fait augmenter la dose du coagulant, par contre la dose du coagulant a été diminuée par l'augmentation de la température ;

La figure V.2 représente le diagramme des interactions pour la dose du coagulant ; les courbes étant parallèles traduisent une interaction nulle ; et les courbes très différentes traduisent une interaction forte.

Les droites du graphique n'étant pas parallèles, on en déduit qu'ils y ont interaction entre : turbidité et pH ; pH et température ; turbidité et température.

Au point du centre : à turbidité 14 NTU, température 14.2 °C et pH de 8.125

La valeur de la dose du coagulant ( $Y_{\text{calculé}}=34.375$  mg/l)

Par contre  $Y_{\text{réel}}=40$  mg/l

$Y_{\text{calculé}}-Y_{\text{réel}}=40-34.375=5.225$  mg/l.

Ces deux valeurs ne peuvent pas être considérées comme égales.

Le modèle polynomial du premier degré est donc insuffisant pour expliquer les résultats expérimentaux. Il faut passer à un modèle du second degré et pour cela il faut ajouter des points expérimentaux.

### V.3.2 Plant pour surface de réponse

#### V.3.2.1 Construction du plant pour surface de réponse

Nous allons modéliser expérimentalement la réponse avec un modèle du second degré en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse.

Le choix s'est donc porté sur un modèle polynomial de degré 2 de la forme

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i * x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} * x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2 \\ i \neq j}}^k a_{ij} * x_i x_j \quad (\text{V. 6})$$

Avec

Y : réponse du modèle

$a_i$  : Coefficients du modèle

$x_i$  : Variables du modèle

K : Nombre de facteurs (K=3).

L'idée souvent retenue pour passer à un modèle du second degré après une étude factorielle tout en conservant les essais déjà réalisés consiste simplement à compléter par les essais

pour l'estimation du modèle de degré plus élevé. Donc le plan composite central est nécessaire de réaliser un total de 20 expériences avec 8 expériences ont été réalisées précédemment pour pouvoir évaluer l'erreur expérimentale.

La qualité de la prévision sera testée par trois critères :

- l'écart-type de l'estimation sur la réponse ( $\sigma$ ),
- le coefficient de régression multiple ajusté au carré ( $R^2$ ),
- les courbes des résidus permettant de visualiser l'écart entre le taux expérimental et le taux calculé à partir du modèle postulé et ceci pour chacun des échantillons.

### V.3.2.2 Caractéristiques du problème

Le tableau V.3 représente les caractéristiques du problème.

**Tableau V.3:** Caractéristiques du problème

Objectif de l'étude	Etude des effets
Nombre de variables	3
Nombre d'expériences	20
Nombre des coefficients	10
Nombre de réponses	1

### V.3.2.3 Interprétation

Le calcul a conduit au modèle suivant (exprimé en variables réduites)

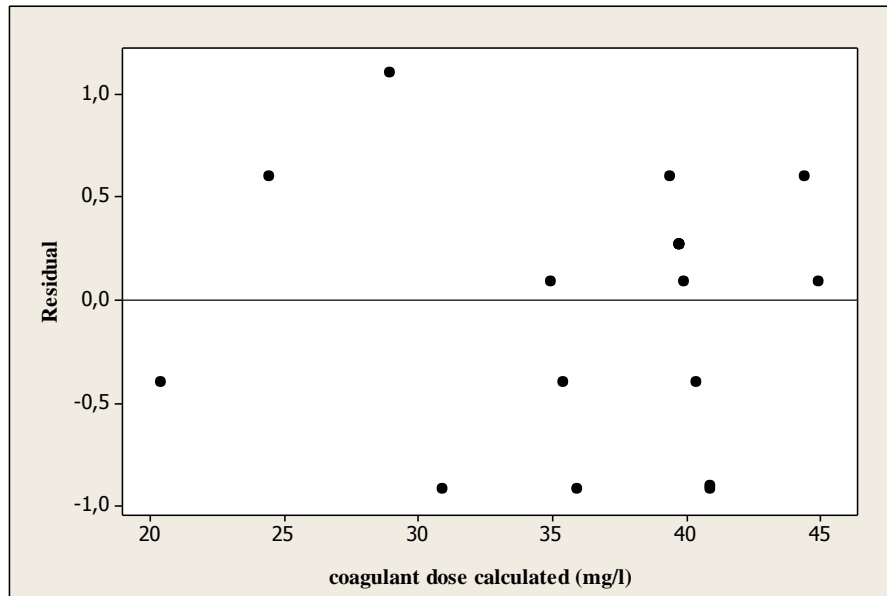
$$\text{DOSE} = 39.7273 + 7 * \text{TU} + 2 * \text{PH} - 3 * \text{T} - 1,8182 * \text{TU}^2 - 1,8182 * \text{PH}^2 - 1,8182 * \text{T}^2 - 0,6250 * \text{TU} * \text{PH} + 1,8750 * \text{TU} * \text{T} - 0.625 * \text{PH} * \text{T} \quad (\text{V.7})$$

$$\sigma = 0.808337$$

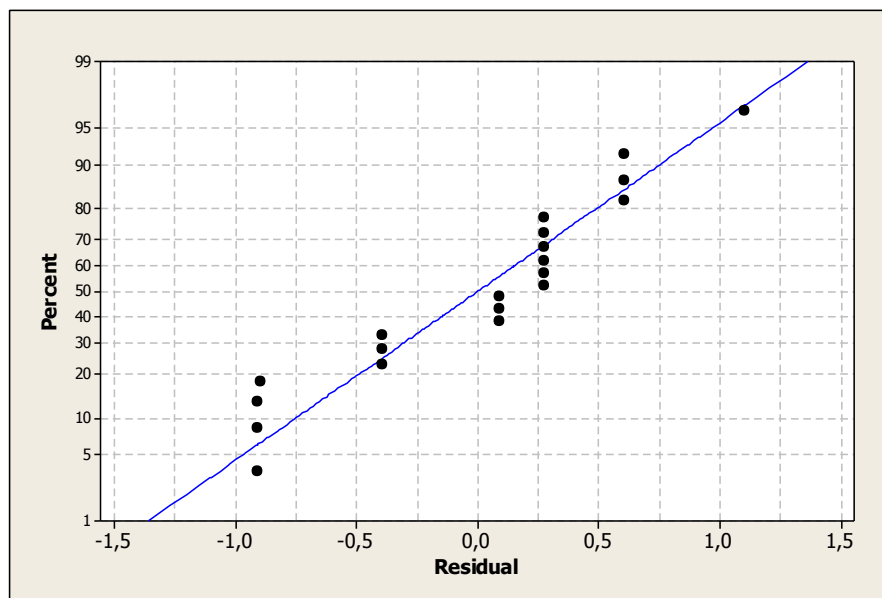
$$R^2 = 0.9915$$

Aussi bien l'écart-type que le coefficient de régression montre que ce modèle est d'excellente qualité.

Ceci est confirmé par la courbe des résidus (Figure V.3 et V.4)



**Figure V.3 :** Répartition des résidus en fonction de la dose du coagulant calculé



**Figure V.4:** Répartition des résidus sur la droite de Henry

La figure V.3 montre la bonne répartition des résidus de part et d'autre de l'axe 0.

La plus grande erreur d'ajustement commise de l'ordre de 1,10227 pour une réponse observée de 28,8977;

La figure V.4 montre que l'ensemble des résidus se sont bien alignés sur la droite de Henry ;

L'étude graphique des deux figures prouve alors que l'ensemble des résidus suit une loi normale ;

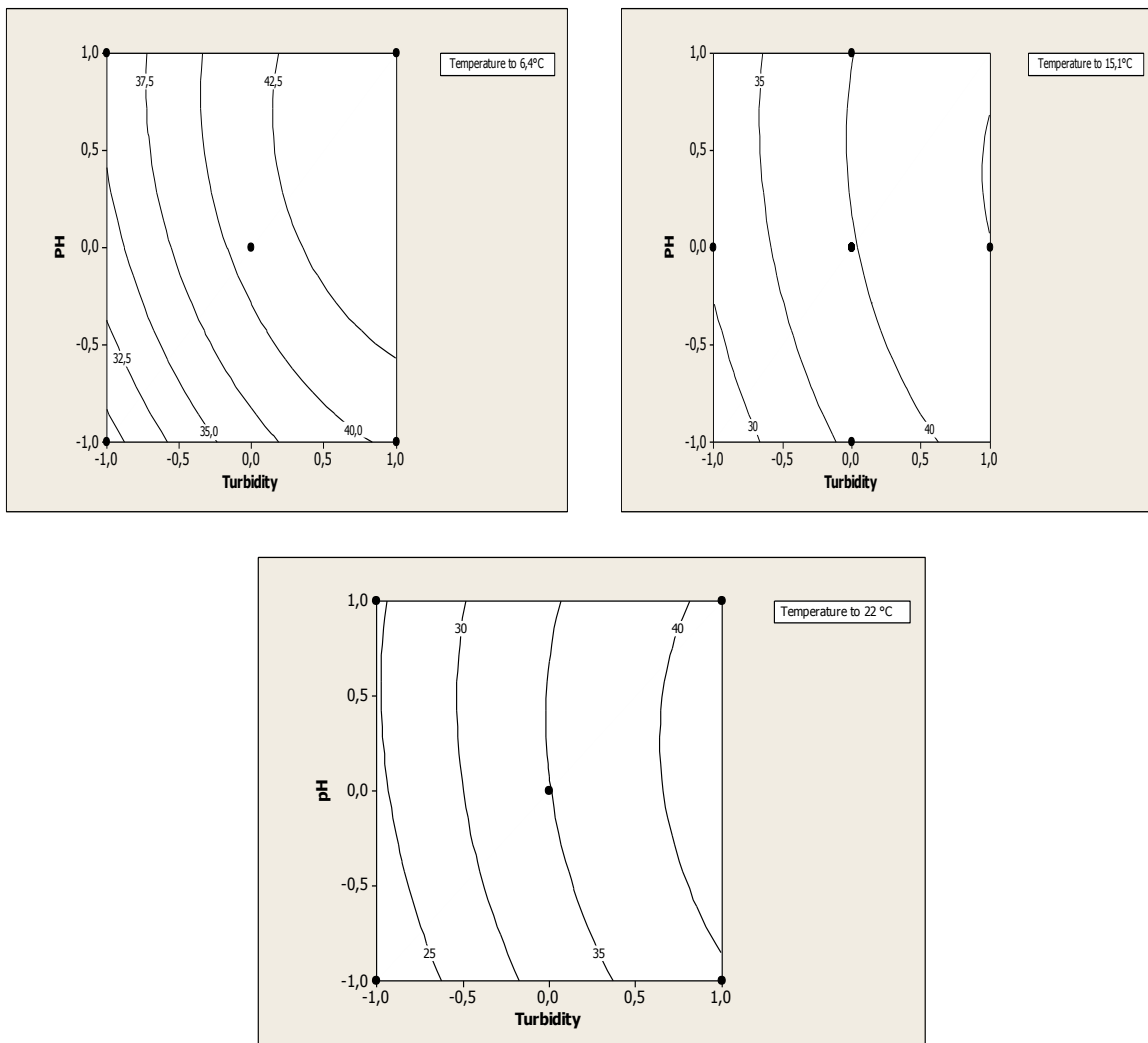
Dans ces cas bien précis, le taux du coagulant croît avec la turbidité et le pH, et décroît avec la température.

Dans notre cas, l'influence d'un facteur peut s'interpréter aussi facilement puisqu'il intervient non seulement de manière linéaire et/ou quadratique mais aussi par son non interaction avec un ou plusieurs autres facteurs.

La complexité de la coagulation est représentée clairement si on utilise la représentation par courbes d'iso-réponse (figure V.5, V.6, V.7).

Les courbes des figures V.5, V.6, V.7 représentent le taux de traitement optimum dans le plan :

- Turbidité, pH, l'autre variable température étant fixée (Figure V.5).
- température, pH, l'autre variable turbidité étant fixée (Figure V.6).
- Turbidité, température, l'autre variable pH étant fixé (Figure V.7).



**Figure V.5** : courbe d'iso-réponse : à température fixée

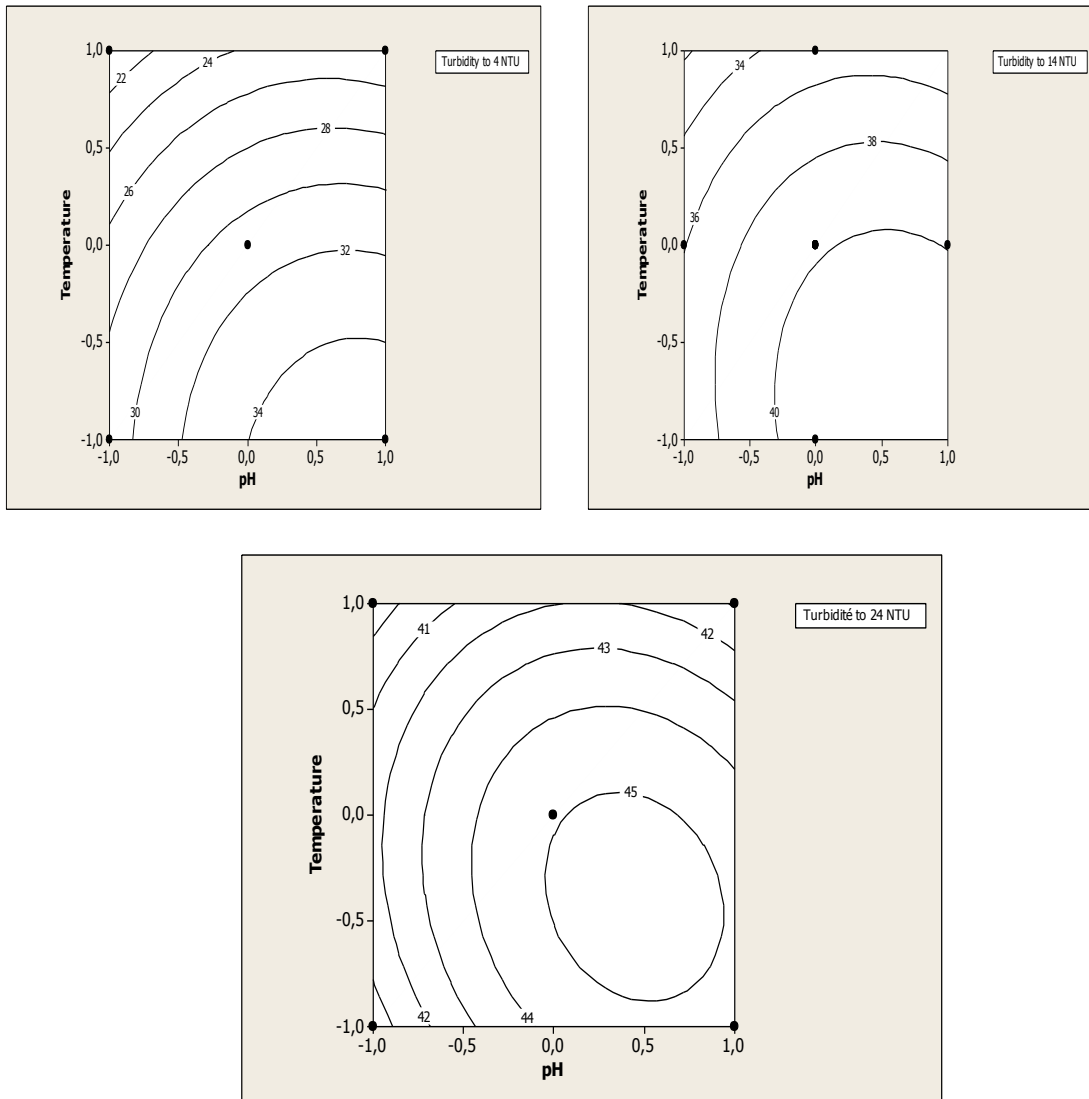
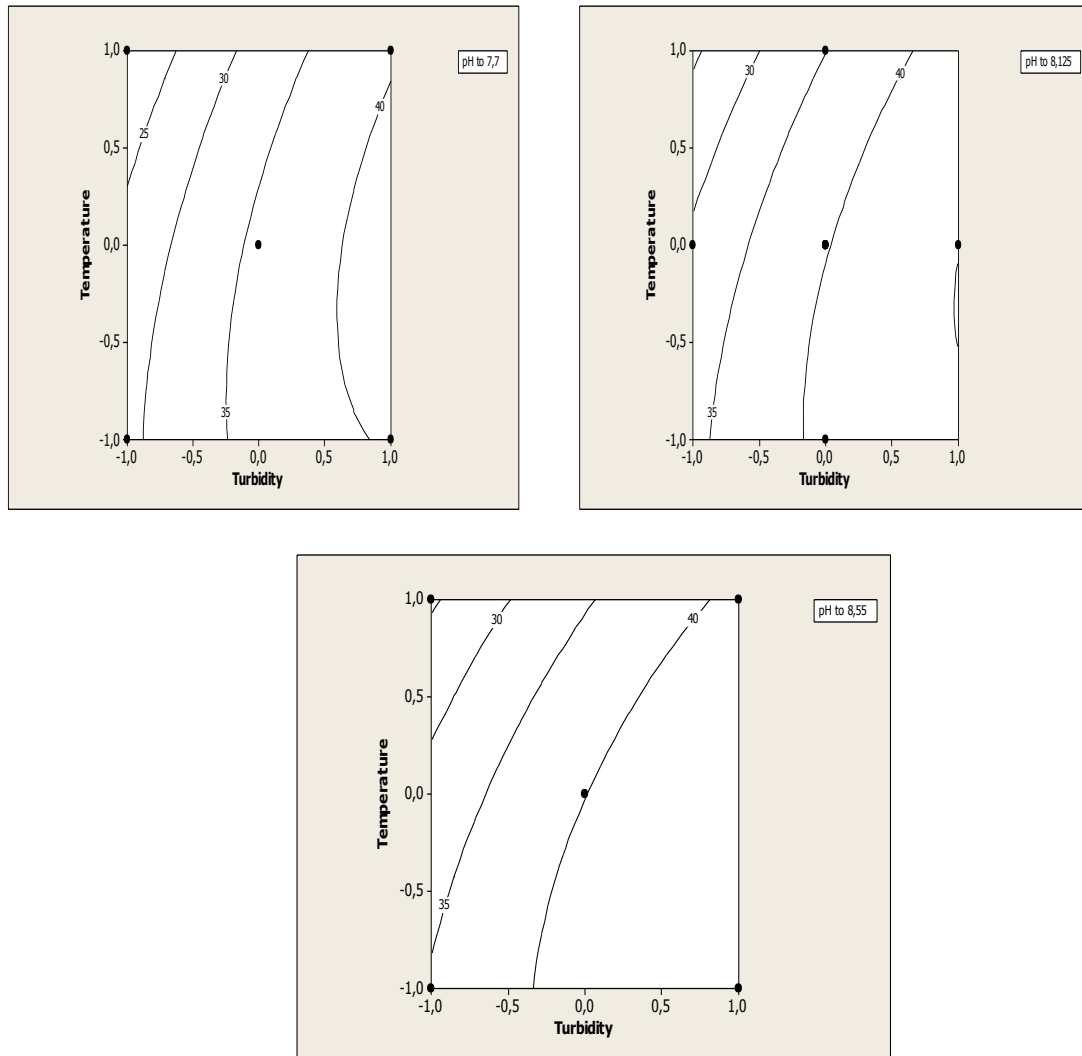


Figure V.6 : courbe d'iso-réponse : à turbidité fixée





**Figure V.7 :** courbe d'iso-réponse : à pH fixe

A température constante le taux du coagulant croît avec le pH et la turbidité (figure V.5) ;

A moyenne et faible turbidité (figure V.6) le taux du sulfate d'aluminium est croît avec la le pH et décroît avec la température, mais pour une turbidité de 24 NTU le taux peut varier et pratiquement constant quelle que soit la température et pH ;

D'après la figure V.7, on remarque bien que le taux du sulfate d'aluminium croît avec la turbidité et décroît avec la température pour une valeur fixe de pH.

Les résultats montrent que la turbidité est le paramètre le plus influence sur le taux optimum du sulfate d'aluminium.

**V.4 Conclusion**

Cette étude a été montrée que le modèle polynomial d'ordre deux est d'excellente qualité ; Cette modélisation, n'est bien entendu, pas universelle. Cependant, son utilisation sur des eaux aux caractéristiques proches de celles d'Oued EL Athmania, pourrait être envisagée. De même, sa forme avec quelques modifications, pour tenir compte de l'invariabilité de certains paramètres.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce travail l'intérêt est porté sur l'étude du processus de la coagulation floculation et sédimentation ainsi que l'optimisation de ce dernier afin de réduire la turbidité de l'eau. Cette étude est organisée selon deux parties : une expérimentale et l'autre modélisation et simulation.

Au début de la phase expérimentale, une gamme des coagulants minéraux tels que le  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  ainsi que le mélange des deux coagulants  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  et  $\text{FeCl}_3$  ont été utilisées. Les résultats obtenus montrent que le coagulant le plus efficace vis à vis réduction de la turbidité est le sulfate d'aluminium ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), ou la valeur obtenue était de l'ordre de 96.72%. Mais de point de vue réduction de la matière organique les résultats montrent que le sulfate ferrique ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) et le plus efficace ou la valeur obtenue était de l'ordre de 58.33 %.

Par la suite on a procédé à l'application des coagulants naturels tels que le Cactus, l'Aloe Vera et l'Acorn.

Le Cactus sous forme poudre a donné une réduction de la turbidité de l'ordre de 49,78%, pour les eaux destinées à la consommation et 92,16% pour les eaux usées. Cette dernière étude a montrée que la turbidité initiale de l'eau a une influence remarquable sur la réduction de la turbidité.

Dans le but d'améliorer l'efficacité des trois coagulants naturels étudiés, des solvants ont été utilisés, tels que l'eau distillée, le chlorure de sodium, l'hydroxyde de sodium et l'acide sulfurique. Dans le cas des eaux destinées à la consommation, les résultats obtenus montrent que l'effet des solvants change d'un coagulant naturel à un autre. Comme exemple dans le cas de l'eau distillée le pourcentage de réduction le plus élevé est obtenu lors de l'utilisation d'Aloe Vera où la valeur était de 73.27%.

Lors d'application de chlorure de sodium le meilleur pourcentage de réduction de la turbidité et obtenu pour le coagulant à base d'Acorn (68.90 %) et cela toujours pour le cas des eaux destinée à la consommation. Dans le cas d'utilisation de l'hydroxyde de

sodium le coagulant le plus efficace est le Cactus avec un pourcentage de réduction de 89.26%.

En fin pour le traitement par l'acide sulfurique, la meilleure réduction de turbidité est obtenue lors de l'utilisation de l'Aloe Vera ou la turbidité a été réduite de 5.5 à 2.2 NTU.

Pour situer la flexibilité d'application des différents coagulants naturels cités précédemment, une application sur les eaux usées a été réalisée. Les résultats obtenus ont été aussi très importants. A titre d'exemple l'Aloe Vera traité par l'eau distillée, Cactus traité par NaOH et l'Acorn traité par NaCl ont augmentés le pourcentage de réduction de la turbidité à 93.04%, 94,24% et 89.35% respectivement.

Les conditions optimales obtenus lors de l'application de Jar test (dose et pH) pour les trois coagulants naturels considérés, ont été appliqués sur le pilote de coagulation floculation sédimentation qui se trouve au niveau de la faculté de génie des procédés. Les eaux destinées à la consommation sont considérées dans cette partie expérimentale. Les résultats obtenus montrent que lors de l'utilisation de NaOH comme solvant, pour le coagulant à base de Cactus, le pourcentage d'élimination était de 35.74% pour un temps de décantation de 30 minutes. L'augmentation du temps de décantation fait augmenter le pourcentage de réduction de la turbidité où il atteint les 66.61% pour un temps de décantation de 04 heures. Dans le cas d'utilisation de l'eau distillée comme solvant pour le coagulant Aloe Vera, le pourcentage de réduction de la turbidité passe de 35.25 à 46.77% pour un temps de décantation de 30 minutes et 04 heures respectivement.

Dans le cas d'utilisation de NaCl comme solvant pour le coagulant Acorn, le pourcentage de réduction de la turbidité passe de 35.48 à 50% pour un temps de décantation de 30 minutes et 04 heures respectivement.

Pour la partie modélisation du processus de la coagulation floculation, trois paramètres influençant la dose du coagulant ont été considérés, la turbidité, le pH et la température. en utilisant un model polynomiale du premier degré. Qui a donné une valeur de la dose du coagulant (34.37 mg/l) loin de la valeur obtenue dans l'expérimentale (40 mg/l) c'est que nous a encouragé à testé model du 2<sup>ème</sup> degré effectivement le résultat de cette simulation nous a donné une valeur de la dose du coagulant de l'ordre de 39.72 mg/l qui est plus proche de la valeur théorique.

Cette étude ouvre certains nombre de perspectives relatives à la recherche et la mise au point des coagulants naturels applicables au traitement des eaux destinées à la consommation et même usées. Aussi l'étude de la possibilité de la valorisation du résidu après extraction par solvant. Et finalement la possibilité de la modélisation du processus de la coagulation floculation avec considération des bio-coagulants.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

[1] : A.Allouane : Caractérisation d'une argile (Bentonite) de la région de Maghnia pour l'adsorption du phénol. Thes, Ing, CI, U. Ouargla (2005) 22 - 40.

[2] : I.Chaib et H.Koul : Contribution au dimensionnement d'une station d'épuration pour la station de Haoud El Hamra. Thes, Ing, GC, U.Kasdi Merbah Ouargla (2003) 3-10.

[3] : M.Bouhada et S.Zentar : Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimique des eaux usées industrielles et leurs impacts sur la nappe phréatique de Oued Mzab. The, Ing, GC, U.Kasdi Merbah Ouargla (2006) 70 p.

[4] : A.Dubakeur : L'eau problème de santé publique. Technique et Sciences 2 (1990) 14 16.

[5] : [fr.wikipedia.org/wiki/traitement des eaux usées](http://fr.wikipedia.org/wiki/traitement_des_eaux_usées).

[6]: [www.safewater.org](http://www.safewater.org)

[7] : Farida Harrlekas ; « Couplage des procédés membranaires aux techniques physico-chimique ou biologiques pour le traitement des rejets liquides de l'industrie de textiles » ; Thèse de doctorat ; Université Cadi Ayyad de Marrakech et de l'institut national polytechnique de Lorraine ; 2008

[8] :Souad Ezzia ; « Traitement des eaux de rejets de l'unité ceramit-Tenes- » ; Mémoire de magister ; Université Hassiba Ben Bouali de Chlef ; 2007.

[9]: F.Worrall et al : Quantum vs. topological description in the development of molecular models of groundwater pollution by pesticides. Chemosphere 54 (2004) 585-596.

[10] : N.Oubacha : Décontamination des eaux contenant des colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétiques. Thes, Master, GE, U.Mouloud Mammeri Tizi Ouzou (2011) 122 p.

[11] : BOEGLIN Jean-claude. Propriétés des eaux naturelles. Technique de L'ingénieur, traité environnement, G1 110.

[12] : Abdelkader GAÏD « Techniques de l'Ingénieur » Ingénieur Process, C5220

- [13] : Rodier.J « analyses des eaux naturelles et des eaux résiduaires et eaux de mers » 8<sup>ème</sup> édition Dunod, Paris 1996
- [14] : Gaid « épuration biologique des eaux usées urbaines » Alger 1984, tome 1.
- [15] : 'Source [www.linternaute.com](http://www.linternaute.com)' caractéristique de l'eau.
- [16] : Rodier.J « analyse chimique et physico-chimique de eau » édition Dunod, paris 1978
- [17] : Office international de l'eau
- [18] : Dégrement « mémento technique de l'eau » 8<sup>ème</sup> édition, paris 1978
- [19] : FRANCK Rejsek. Analyse des eaux aspects réglementaires et techniques, lycée de borda
- [20] : RODIER J. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 7<sup>ème</sup> édition 1996.
- [21] : F. Rejesk « analyse de l'eau » centre régional de documentation pédagogique d'aquitaine, paris 2002
- [22] : <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agrucult/aqustat/ALG.HTM>
- [23] : Jean. Jacques Donze ; « Chimie organique - colorant textiles - » ; Techniques de l'ingénieur ; K350 ; 1988
- [24] : comité de recherche et de sensibilisation d'Eau Secours! La pollution de l'eau. Novembre 2006.
- [25] : Benzinia. C. 2003 -Mémoire de fin d'études, Tiaret
- [26] : M. Defranceshi « l'eau dans tout l'états » édition marketing 5A Ellipses 1996
- [27] : cloude Boeglin «technique d'ingenieur » G. d'environnement, G<sub>1</sub> 110
- [28] : Allain florent bernard juliette grimaldi léo (environnement et progrès)
- [29] : Dégrement « mémento technique de l'eau » 7<sup>ème</sup> édition, paris 1972.
- [30] : J. Claude « technique d'ingenieur » G. de procedes, J<sub>3</sub>-940.
- [31] : Grégorio crini et pierre Marie Badot « traitement et épuration des eaux industrielles 18 polluées » 2007
- [32] : Louis armand « mémento technique de l'eau » 1966
- [33] : [fr.wikipedia.org/wiki/traitement des eaux usées.](http://fr.wikipedia.org/wiki/traitement_des_eaux_usées)

- [34] : CARDOT Claude. Génie de l'environnement : les traitement de l'eau. Paris, 1999, P : 9.
- [35]: Masson, M. H., Canu, S., Grandvalet, Y., Lyngaard-Jensen, A., Software sensor design based on empirical data, *Ecological Modelling*, 120, 131-139, 1999.
- [36] : DEGREMONT. Mémento technique de l'eau, Technique et documentation, tome 1, 1989, P : 5, 24,25.
- [37] : KEMMER F.N. Manuel de l'eau, Ed. NALCO, 1984
- [38] : DEGREMONT, Mémento technique de l'eau, Lavoisier SAS Lexique technique de l'eau, Paris, dixième édition, 2005
- [39] : DESJARDINS R. Le traitement des eaux, 2è me édition, Ed. de l'école polytechnique de Montréal, 1997
- [40] :BEAUDRY Jean-Paul. Traitement des eaux, Ed. Le Griffon d'argile INC, Canada, 1984
- [41] : QUINTERNET.D,"Contribution à la caractérisation des floccs (application à la floculation de suspension argileuse) ", Thèse de Doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1985
- [42] : DESJARDINS.R,"Le traitement des eaux, 2eme édition revue de l'école polytechnique de Montréal, 1990
- [43] : VALIRON F., Gestion des eaux : alimentation en eau –assainissement, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris,1989
- [44]: Buffle, J., Altmann, R. S., Filicella, M., and Tessier, A. . Complexation by natural heterogeneous compounds: site occupation distribution functions, a normalized description of metal complexation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, (1990) 1535-1553
- [45]: Lartiges, B. S., Bottero, J. Y., Derrendinger, L. S., Humbert, B., Tekely, P., and Suty H. Flocculation
- [46]: Dickinson, E. and Eriksson, L. Particle flocculation by adsorbing polymers. *Advances in Colloid and Interface Science*, 34, (1991) 1-29
- [47]: Derjaguin, B. V. and Landau, D. *Acta. Physicochim. URSS* 1941. 733
- [48]:Benefield, L. O., J. F. Judkins et B. L. Weand. 1982. *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 510 p.
- [49]: Bratby, J. (1980). *Coagulation and flocculation: with an emphasis on water and wastewater treatment*, Croydon, Eng, Uplands Press



- [50]: Desjardins, C. 1999. Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée (Actiflo) à l'aide d'une procédure modifiée de jar test (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- [51]: Edeline, F. 1992. L'épuration physico-chimique des eaux: théorie & technologie. 2<sup>e</sup> éd., Paris, Lavoisier, 282 p
- [52]: Ruehrwein, R. A. et D. W. Ward. 1952. «Mechanism of Clay Aggregation by Polyelectrolytes». *Soil Science*, vol. 73, p. 485-492.
- [53]: LaMer, V. K. et T. W. Healy. 1963. «Adsorption-flocculation Reactions of Macromolecules at the Solid-liquid Interface». *Pure and Applied Chemistry*, vol. 13, p. 112-113
- [54] : LENGU, K.M. Effets comparés de divers coagulants sur l'enlèvement de la matière organique des eaux à potabiliser - influence de la préhydrolyse. Mémoire de maîtrise - Département de Génie Civil. École Polytechnique de Montréal. (1994) 120
- [55]: FIESSINGER, F. "Coagulation", paper presented in congress of AIDE, Kyoto 1978. *Liaison Cortambert*, vol.53, p. 32-37, Avril 1979.
- [56]: Teramoto, T. 1993. Deep ocean circulation: physical and chemical aspects. Amsterdam, Elsevier, 382 p.
- [57]: JULIEN, R. (1983). Étude de la coagulation-floculation-décantation d'une eau colorée froide de faible alcalinité. Mémoire de maîtrise - Département de Génie Civil, École Polytechnique de Montréal, 157p
- [58] : LIND C., Coagulation Control and Optimization: Part 1, Public Works, Oct. 1994
- [59] : LIND C., Coagulation Control and Optimization: Part 2, Public Works, Nov. 1994.
- [60]: CAMP, T.R., ROST, D.K., and BHOSTA, B.V. Effects of temperature on the rate of floc formation, *Journal A m A*. (1940) 893- 901.
- [61]: VAN BENSCHOTEN, S.E., EDZWALD, S.K. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts-1. Hydrolytic reactions of alum and polyaluminum chloride. *Euter Research*, (1990) 1519-1526
- [62]: HANSON. A.T., CLEASBY, I.L. The effects of temperature on turbulent flocculation : fluid dynamics and chemistry. *Journal A WA*, (1990) 56-73
- [63]: VAN BENSCHOTEN, J.E., EDZWALD, J.K., RAHMAN, M.A. Effects of temperature and pH on residual aluminium for alum and polyaluminium coagulants. *Waters Supply*, (1992) 49-54.
- [64]: KANG, L.S., CLEASBY, J.L. Temperature effects on flocculation kinetics using Fe(III) coagulant. *Journal of Environmental Engineering*, décembre (1995) 893- 901.

- [65]: La Mer, V. K. and Healy, T. W. The role of filtration in investigating flocculation and redispersion of colloidal dispersions. *Journal of Physical Chemistry*, 67, (1963) 2417-2420.
- [66]: Hogg, R. Flocculation and dewatering. *International Journal of Mineral Processing*, 58, (2000) 223-236
- [67]: Buffle, J., Wilkinson, K. J., Fillella, M., and Zang, J. A generalized description of aquatic colloidal interactions: the three-colloidal component approach. *Environmental Science & Technology*, 32 (1998) , 2887-2899
- [68]: Pattabi, S., Ramasami, K., Selvam, K., Swaminathan,. Influence of polyelectrolytes on sewage water treatment using inorganic coagulants. *Indian J. Environ. Prot.* 20 (2000), 499–507
- [69]: Hunter, Robert J. Zeta potential in colloid science, Principles and applications. Ottewill R.H. and Rowell R.L. Academic Press. 2002
- [70]: Mejia, A., Cisneros, B., Particle size distribution (PSD) obtained in from an advanced primary treatment process using diterent coagulants. *Chem. Water Waste-water Treat. VI, Proc. Gothenburg Symp., 9th, 2000* 257–268.
- [71] : KETTAB.A "Traitement des eaux, les eaux potables". Edition O.P.U, 1993
- [72] : DESJARDINS, R. Le traitement des eaux. Éditions de l'coie Polytechnique de Montréal, 2' édition revue et améliorée. (1997) 304
- [73] : TARDAT-HENRY, M. Évolution des dérivés de l'aluminium utilisés comme agents de coagulants. *Sciences et Techniques de l'Eau.* (1989) 297-304.
- [74] : HUND.T.R et O'MELIA.C.R, Aluminium-fulvic acid interactions: mechanisms and applications. *J. Am. Wat. Wks. Ass.*, 80, N°4, 176-186, 1988.
- [75]: Ndabigengesere, A. et K.S. Narasiah (1998) Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds, *Wat. Res.* 32 (3): 781-791.
- [76]: Jahn, S.A.A. (1981) traditional water purification in developing countries Existing methods and potential application, *Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ), Manual 117, Eschborn.*
- [77]: Jahn, S.A.A. (1988) Using *Moringa* seeds as coagulants in developing countries. *Journ. Am. Wat. Wks. Ass.* 90: 43-50.
- [78]: Jahn SAA & Dirar H (1979) Studies on Natural Water Coagulants in the Sudan, with Special Reference to *Moringa Oleifera* Seeds. *WATER SA* 5:90–106
- [79]: Zhang, J., Fang, Z., Luo, Y. and Yang, H. (2006). "A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment." *Process Biochemistry*, 41(3), 730 – 733.

- [80]:B. S. Shilpa et al 2012 “ Evaluation of Cactus and Hyacinth Bean Peels as Natural Coagulants”*International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, Volume 3, No.3
- [81]:H.Aylin Devrimci“Algal alginate: A potential coagulant for drinking water treatment“*Desalination* 299 (2012) 16–21
- [82]: Marina Šciban et al 2009“Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn “ *Bioresource Technology* 100 (2009) 6639–6643
- [83]: Sciban M & Antov M (2006) Extraction and partial purification of coagulation active components from common bean seed. *Acta periodica technologica* 37:37-43.
- [84]: G. Muthuraman \*, S. Sasikala ,2014”Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20 (2014) 1727–1731
- [85]: Sonal Choubey et al 2012” Comparison of Efficiency of some Natural Coagulants-Bioremediation”ISSN 2250-2459, Volume 2, Issue 10, October 2012.
- [86]: Babu R & Chaudhuri M (2005) Home water treatment by direct filtration with natural coagulant. *Journal of water and health* 3:27–30.
- [87]: Beltrán-Heredia J, Sánchez-Martín J & Gómez-Muñoz MC (2010) New coagulant agents from tannin extracts: Preliminary optimisation studies. *Chemical Engineering Journal*: 1–7.
- [88]: Zurina Z. Abidin et al (2013)” Optimisation of a method to extract the active coagulant agent from *Jatropha curcas* seeds for use in turbidity removal”*Industrial Crops and Products* 41 (2013) 319– 323.
- [89]: Habsah Alwi et al (2013)” A Preliminary Study of Banana Stem Juice as a Plant-Based coagulant for Treatment of Spent Coolant Wastewater”*Journal of Chemistry*, Article ID 165057
- [90]: Ndabigengesere, A., Narasiah, K.S. and Talbot, B.G. (1995). “Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*.” *Water Research*, 29(2), 703 - 710.
- [91]:K. Bilba, M. A. Arsene, and A.Ouensanga, “Study of banana and coconut fibers. Botanical composition, thermal degradation and textural observations,” *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 1, pp. 58–68, 2007.
- [92]: Aziza ABID, Abdeljalil ZOUHRI\* et Abdelali IDER‘Utilisation d'un nouveau bio-floculant extrait de cactus marocain dans le traitement des rejets chargés de chrome (VI) par le procédé de coagulation floculation’ *Afrique SCIENCE* 05(3) (2009) 25 – 35 ISSN 1813-548X
- [93]:BEAUDRY.JP.’*Traitement des eaux*’.Edition de Griffon d’argille,1984

[

## ANNEXE

### 1 Mesure de turbidité

NTU : Nephelometric turbidity units.

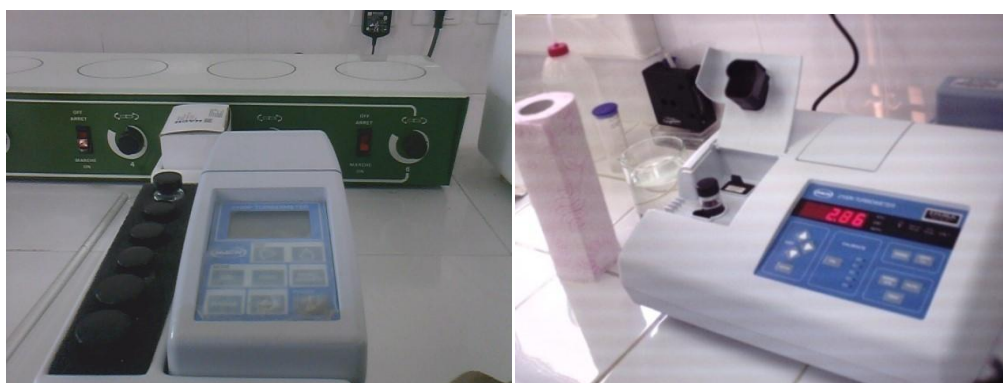
Est une mesure orientée sur la recherche des particules colloïdales non décantables et non filtrable (liée à la transparence).

On utilise un turbidimètre équipé de cuve de mesure, modèle 2100N est un néphélobimétrie ayant la possibilité de mesurer soit le rapport lumière dispersés/lumière transmise soit lumière dispersée à 90 seul ;

Au laboratoire LIPE, la turbidité de l'eau a été mesurée à l'aide de turbidimètre portable de marque HACH.

#### Principe

Un échantillon est soumis à un faisceau optique déterminé et l'intensité de la lumière diffusée est mesurée par une cellule photoélectrique.



**Figure 1 :** Turbidimètre

### 2 Mesure du pH

La mesure du pH s'effectue au moyen d'un PH-mètre à sonde de température intégrée. Les résultats de température sont exprimés en (°C).



**Figure 2:** pH mètre

### 3 Mesure de conductivité, salinité

La conductivité détermine l'ensemble des minéraux (cations + anions) présents dans une solution, elle traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant. L'unité de mesure est le micro siemens/cm ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )



**Figure 3:** multi appareille

La conductivité et la salinité sont mesurées par une multi appareille

### 4 Mesure de couleur

La mesure de la couleur s'effectue au moyen d'un spectrophotomètre, l'unité de mesure est le Pt Co



**Figure 4:** Spectrophotomètre

**Mode opératoire**

- Sélectionnez le programme correspondant à la mesure de la couleur de l'eau ( $\lambda=454$  nm);
- Remplissez une cuvette avec 10 ml de l'échantillon à mesurer (à peu près 1,5 cm du haut) ceci représente la couleur de l'échantillon ;
- Remplissez une 2<sup>ème</sup> cuvette avec de l'eau distillée. Ceci constituera le blanc
- Placez- la cuvette représentant le blanc dans le logement de mesure en respectant l'ergot d'alignement.
- Appuyez sur la touche ZERO ;
- lorsque l'afficheur indique 0.0, insérez à la place la cuvette pour la couleur de l'échantillon ;
- Appuyez sur la touche READ DIRECT. Au bout de quelques secondes, l'instrument indiquera la couleur.

**5 Le Titre hydrotimétrique ou la dureté totale TH**

Il indique la concentration en sels de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et de magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) de l'eau, aussi appelé dureté de l'eau.

**Principe**

Formation des complexes des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  avec une solution titrée de sel dissodique de l'acide éthylène diamine tétracétique (EDTA) en milieu tamponné à pH10. La fin de la réaction est indiquée par le noir ériochrome T.

**Matériel**

Une burette graduée en ml et son support

Un erlenmeyer de 250 ml.

Une fiole jaugée de 100 ml.

Un compte-gouttes.

**Réactifs**

Noir ériochrome T (Net) en poudre ou en solution :

NET .....0,25 g

Alcool absolu..... 100 ml

Solution à garder à l'abri de la lumière.

Solution tampon K10 :

NH <sub>4</sub> Cl.....	34 g
Ammoniaque concentré.....	285 ml
Tartrate double de K et Na .....	200 g
Eau distillée (q.s.q.) .....	1000 ml
Solution d'EDTA (ou "complexon III") N/25 :	
Sel dissodique de l'acide éthylène diamine tétracétique.....	7,44 g
Chlorure de magnésium (MgCl <sub>2</sub> - 6H <sub>2</sub> O).....	0,2 g
Eau distillée .....	1000 ml

### Mode opératoire

Remplir la burette avec la solution d'EDTA jusqu'au trait zéro.

Introduire 100 ml d'eau sous analyse dans l'erenmeyer.

Ajouter 20 gouttes environ de K 10 et 4 gouttes environ de NET (ou une pincée de NET en poudre) : la solution vire au rouge vineux en présence de TH.

Verser la solution d'EDTA jusqu'au virage au bleu franc

Lire le volume d'EDTA (Vml) sur la burette.

La dureté totale TH s'exprime :

- en degré français :  $TH = Vml \times 2$  en ° F.
- en milliequivalent par litre :  $TH = Vml \times 4$  en meq/l.10
- en ppm de CaCO<sub>3</sub> :  $TH = Vml \times 20$  en ppm de CaCO<sub>3</sub>

### 6 Mesure du titre alcalimétrique (TA)

#### Principe

Dosage de l'alcalinité par un acide fort. La fin de la réaction est indiquée par la phénolphtaléine.

#### Matériel

Une burette graduée en ml et son support

Un erlenmeyer de 250 ml.

Une fiole jaugée de 100 ml.

Un compte-gouttes.

### Réactifs

Phénolphtaléine à 1 % :

Dissoudre 10 g de phénolphtaléine (C<sub>20</sub> H<sub>14</sub> O<sub>4</sub>) dans 990 g d'alcool absolu.

Liqueur alcalimétrique : solution N/25 :

Acide sulfurique :

Préparer une solution normale (N) contenant 49,041 g de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en produit pur par litre.

On pourra obtenir 1000 ml d'une solution N/25 en prenant 40 ml de la solution (N) que l'on complétera avec 960 ml d'eau distillée.

### Mode opératoire

Remplir la burette avec la solution alcalimétrique jusqu'au trait zéro.

Introduire 100 ml d'eau sous analyse dans l'erenmeyer.

Ajouter 4 à 5 gouttes de phénolphtaléine : la solution vire au rouge.

Verser la solution alcalimétrique goutte à goutte jusqu'à disparition de la coloration.

Lire le volume d'acide sur la burette en ml.

Le TA s'exprime :

- en degré français :  $TA = V_{ml} \times 2$  en °F.
- en milliéquivalent par litre :  $TA = V_{ml} \times 4$  en meq/l.10
- en ppm de CaCO<sub>3</sub> :  $TA = V_{ml} \times 20$  enppm de Ca CO<sub>3</sub>.

## 7 Mesure du titre alcalimétrique complet (TAC)

### Principe

Dosage de l'alcalinité par un acide fort. La fin de la réaction est indiquée par le hélianthine (ou méthylorange).

### Matériels

Une burette graduée en ml et son support

Un erlenmeyer de 250 ml.

Une fiole jaugée de 100 ml.



Un compte-gouttes.

### Réactifs

Liqueur alcalimétrique : solution N/25 :

Acide sulfurique :

Préparer une solution normale (N) contenant 49,041 g de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en produit pur par litre.

On pourra obtenir 1000 ml d'une solution N/25 en prenant 40 ml de la solution (N) que l'on complétera avec 960 ml d'eau distillée.

Hélianthine à 1 % :

Dissoudre 10 g d'hélianthine (C<sub>14</sub> H<sub>14</sub> NaSO<sub>3</sub>) dans 1000 ml d'eau distillée.

### Mode opératoire

Remplir la burette avec la solution alcalimétrique jusqu'au trait zéro.

Introduire 100 ml d'eau sous analyse dans l'erlenmeyer.

Ajouter quelques gouttes d'hélianthine : la solution vire au jaune.

Verser la solution alcalimétrique jusqu'à virage à l'orange.

Lire le volume d'acide sur la burette ml

Le TAC s'exprime :

En degré français :  $TAC = V_{ml} \times 2$  en °F.

En milliéquivalent par litre :  $TAC = V_{ml} \times 4$  en meq/l.10

En ppm de CaCO<sub>3</sub> :  $TAC = V_{ml} \times 20$  en ppm de CaCO<sub>3</sub>.

### Remarque

Il est pratique de mesurer TA et TAC en une seule manipulation. Pour cela, appliquer la méthode d'analyse du TA et noter le résultat. Une fois l'échantillon sous analyse décoloré, y ajouter quelques gouttes d'hélianthine et suivre la méthode ci-dessus sans remettre de la liqueur dans la burette. Noter la lecture finale qui est le TAC.

### 8 Mesure de la teneur en matières organiques

(Oxydabilité au permanganate de potassium en milieu acide)

## Principe

Le permanganate de potassium fournit en milieu acide la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation totale des matières organiques d'origines diverses contenues dans l'eau.

## Matériels

Une burette graduée en ml et son support

Un erlenmeyer de 250 ml.

Une éprouvette de 100 ml.

Trois pipettes de 10 ml graduées en dixièmes de millilitres.

## Réactifs

Solution de permanganate de potassium N/80 :

Une solution normale (N) contient 31,6068 g de  $\text{KMnO}_4$  en produit pur par litre ;

À partir d'une solution N/10 contenant 3,1607 g de  $\text{KMnO}_4$  pur par litre, on pourra obtenir 1000 ml d'une solution N/80 en prenant 125 ml de la solution N/10 que l'on complète avec 875 ml d'eau distillée.

Solution de sel de Mohr (sulfate de fer et d'ammoniaque) à 0,5 % :

Dissoudre 5 g de sel de Mohr en produit pur dans 500 ml d'eau distillée additionnée de 5 ml d'acide sulfurique en produit pur. Compléter à 1000 ml. On obtient une solution à 0,5 %.

Solution d'acide sulfurique au 1/2 en volume :

Diluer 50 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en produit pur dans 50 ml d'eau distillée. Verser toujours l'acide dans l'eau. Refroidir pendant la préparation pour éviter l'ébullition par réaction exothermique.

## Mode opératoire

Introduire 100 ml d'eau sous analyse dans l'erlenmeyer. Ajouter 2,5 ml d'acide sulfurique au 1/2, puis porte à ébullition. Introduire alors 10 ml de permanganate de potassium N/80 et maintenir à ébullition 10 mn très exactement. Refroidir rapidement, puis introduire 10 ml de solution de sel de Mohr.

Remplir la burette avec la solution de permanganate N/80 jusqu'au trait zéro.

Verser goutte à goutte avec la burette jusqu'à une légère teinte rose.

Lire le volume de permanganate de potassium en ml.

### Expression des résultats

$$MO = V_{KMnO_4}$$

Les résultats sont généralement exprimés en mg/l de  $O_2$  mais peuvent l'être parfois en mg/l de  $KMnO_4$  :

$$1 \text{ mg/l d}'O_2 = 3,95 \text{ mg/l de } KMnO_4.$$

### 6 Interférence

L'indice de permanganate ne peut être déterminé que pour des eaux contenant moins de 500 mg/l d'ions chlorure.

### 9 Mesure des matières en suspension (MES)

(méthode par filtration)

#### Matériel utilisé

appareil de filtration sous vide "Millipore "

membranes en fibres de verre borosilicaté "Millipore " (réf. AP2004700)

trombe à vide

balance de précision ( $\pm 0,1$  mg)

étuve à 105 °C

dessicateur

#### Détermination

sécher la membrane 15 min à l'étuve 105 °C

refroidir dans le dessicateur et peser : soit  $m_1$

prélever un volume d'eau  $V$  tel que la masse de matières retenues sur le filtre soit au moins de  $1 \text{ mg/cm}^2$ .  $V$  ne doit pas être inférieur à 100 ml

placer la membrane sur son support, fixer l'ensemble de filtration, verser l'eau sur la membrane, mettre sous vide et laisser filtrer le liquide jusqu'à écoulement complet ;

rincer à l'eau déminéralisée, couper le vide. Retirer la membrane et la sécher à l'étuve à 105 °C jusqu'à avoir une masse constante (au moins 2h) ;

refroidir au dessiccateur et peser: soit  $m_2$

poids de matières en suspension en mg/l :

$$\text{MES} = (m_2 - m_1) * 1000 / V$$



**Figure 5:** Balance-dessiccateur-étuve



**Figure 6:** Rampe de filtration

## 10 Mesure de résidu sec

Il représente la teneur en matière sèche et inclut à la fois les matières en suspension et sels dissous ;

Le résidu sec est ce qui reste après complète évaporation à 105°C pendant 24 h dans une étuve et dessiccation dans un dessiccateur, il est pesé à l'aide d'une balance digitale (figure 5).

### Mode opératoire

- Laver et sécher les béchers.
- Mettre 2 heures dans une étuve à 105°C pour bien sécher.
- Refroidir dans un dessiccateur 15 min.
- Peser les béchers sec  $m_1$ .
- Introduire 100 ml d'eau sous analyse dans les béchers.
- Evaporer les échantillons dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant (24heures).
- Refroidir a la deuxième fois dans un dessiccateur 15 min.
- Peser de nouveau les béchers  $m_2$ .
- Calculer le résidu sec qui est égale à  $(M_2 - M_1)$

$$\text{R.S} = \frac{M_2 - M_1}{100}$$

## 11 Détermination de la concentration de matière sèche des boues ou la boue produite (MS)

### Mode Opératoire

- Bien homogénéiser la boue, par agitation du flacon.
- Peser une coupelle de porcelaine, propre et sèche : poids  $M_1$  en gr
- Introduire dans cette coupelle un volume  $V$  de boue de 100 ml
- Placer au four à 105 °C, jusqu'à évaporation totale de l'eau contenue dans la boue. Cette étapes nécessite 12 h.
- Peser la coupelle, après refroidissement, dans un dessiccateur :  $M_2$  en gr.

### Expression des résultats

La concentration en MS de la boue est donnée par

$$MS \text{ g/l} = (M_2 - M_1) \times 10$$

## 12 Détermination du CT, COT et CI : méthode par détection infrarouge

L'échantillon contenant des composés carbonylés est introduit dans un tube chauffé à 680 °C qui contient un catalyseur agissant comme oxydant. Les composés de combustion et de dégradation sont sous forme de  $\text{CO}_2$ , qui est analysé par détection infrarouge et quantifié par comparaison à une courbe d'étalonnage. Le carbone organique total (COT) réfère au carbone organique non volatile, qui est mesuré en acidifiant l'échantillon au préalable à l'aide de chlorhydrique pour atteindre un pH inférieur à 2 et en y faisant barboter de l'air de qualité ultra-pure. la concentration en carbone total (CT) de l'échantillon est brulée sur un catalyseur de platine porté à 680 °C . Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) formé est quantifié dans une cellule infrarouge.

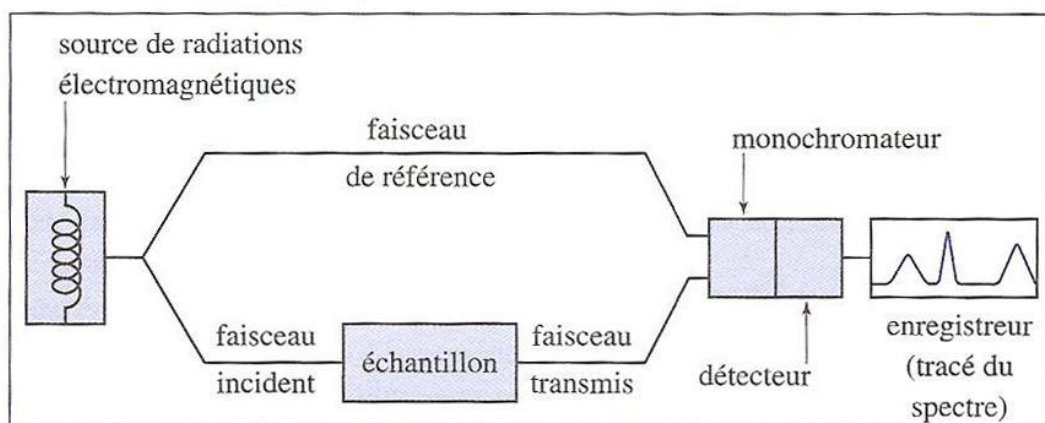


**Figure 7 : COT mètre Innovox Sievers**

## 13 spectrophotomètres infrarouges

### 13.1 Principe de fonctionnement d'un spectrophotomètre

Le principe du spectrophotomètre IR est le même que celui utilisé en UV-visible : l'appareil envoie des radiations de fréquences bien déterminées modifiées progressivement : balayage en fréquence dans le domaine du proche infra rouge



**Figure 8:** Schéma du principe de fonctionnement d'un spectrophotomètre IR

On obtient des spectres qui mesurent la transmittance en fonction du nombre d'onde et non l'absorbance (d'où l'allure des spectres inversés).

Les spectres IR sont donc tracés dans l'intervalle maximal  $[400, 4000]$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), la grandeur portée en ordonnée étant la transmittance  $T=I/I_0$  ou l'absorbance (ou densité optique)  $A = \log I_0/I$ ,  $I$  étant l'intensité transmise par l'échantillon et  $I_0$  l'intensité transmise par la référence.

### 13.2 Préparation de l'échantillon

La préparation dépend de l'appareil utilisé : on peut soit analyser directement le composé pur soit le solubiliser dans un solvant (pour un liquide) ou le disperser dans un solide (pour un solide) avant l'analyse.

Les pastilles sont généralement faites d'un mélange de l'échantillon (de 0,1 à 1%) sous forme de poudre mélangée à du Bromure de Potassium (KBr) qui est transparent aux rayonnements IR dans la zone  $4000 \text{ cm}^{-1}$  à  $500 \text{ cm}^{-1}$ , le tout finement broyé et mélangé dans un mortier de manière à être homogène. Le mélange est pressé à environ 10 tonnes dans une pastilleuse.

IR ne fournit pas d'informations détaillées ou une preuve de moléculaire formule ou de la structure. Il fournit des informations sur des fragments moléculaires, les groupes fonctionnels spécifiquement.

Il est possible de distinguer deux zones différentes sur un spectre infrarouge:

L'intervalle des nombres d'onde compris entre 500 et 1400  $\text{cm}^{-1}$  comporte des pics et bandes d'absorption caractéristiques de l'espèce chimique analysée, Cette zone correspond à " l'empreinte digitale " de l'espèce chimique et permet de l'identifier à partir de spectres infrarouge connus, mais il est en général difficile d'attribuer les pics observés à des groupes d'atomes précis, il est utilisé lorsque comparer des échantillons. De deux échantillons purs affichent le même spectre IR.

L'intervalle des nombres d'onde compris entre 1400 et 4000  $\text{cm}^{-1}$  comporte les bandes d'absorption des différents types de liaison ( avec cependant quelques exceptions pour des liaisons dont les bandes se situent en dessous de 1400  $\text{cm}^{-1}$ , on y trouve la plupart des bandes de vibration d'élongation.

## 14 Jar test-floculation

Un nombre de Jar tests successifs seront effectués afin de déterminer et d'optimiser les résultats de traitement.ces tests sont comme suit :

- 1 Optimisation du PH de coagulation.
- 2 Optimisation de la dose de coagulant seul.
- 3 Essai avec utilisation des polymères comme flocculant.

### 14.1 Procédure

- Préparer les solutions des réactifs.
- Analyser tous les paramètres d'intérêt dans l'eau brute.
- Verser 1L d'eau brute dans les bécher.
- Si l'acide fait partie de l'essai, injecté le.
- Positionner les béchers sous les agitateurs et baisser les agitateurs.
- Démarrer les agitateurs à vitesse rapide (160 tr /min)
- Après trois minutes, réduire la vitesse d'agitation à 30 tr /min

Si des flocculants font partie de l'essai, celles-ci doivent être dosées juste avant de réduire la vitesse.

- Agiter lentement pendant vingt minutes.

- Arrêter l'agitation ; retirer les agitateurs ; lire le pH de coagulation et laisser décanter.
- Après 30 minutes de décantation prélever échantillons de 700ml.
- Lire les turbidités et d'autres paramètres.
- noter les résultats.

## **15 Pilote de coagulation floculation et décantation**

### **15.1 Appareils du cycle**

- Cuve d'alimentation de la suspension, en Plexiglas transparent, cylindrique, capacité symbole D1 utile, 310L
- Cuve d'alimentation du coagulant, en Plexiglas; capacité utile 50 L, symbole D2
- Cuve d'alimentation du floculant, en verre; capacité utile 0,5 L, symbole D3
- Réacteur de mélange de la suspension et des réactifs chimiques, en verre borosilicate, capacité 30L, symbole RI
- Réacteur de mélange de la suspension en verre borosilicate, capacité 8 L, symbole R2
- Agitation des réacteurs avec moteur et arbre d'agitation
- 2 moteurs électriques d'entraînement de l'agitation des réacteurs à vitesse variable, vitesse variable de 0-600 tr/min et 0-120 tr/min, symbole M1 et M2
- Décanteur statique de section rectangulaire avec cône d'évacuation des boues décantées en Plexiglas, lamelles de décantation amovibles, pour le fonctionnement à contre-courant et co-courant (inclinaison des lamelles 30°), capacité 160 L, symbole D4
- Débitmètre à flotteur du circuit d'alimentation de la suspension dans le réacteur, échelle 30-300 L/h, symbole Fil
- Débitmètre à flotteur du circuit d'alimentation du coagulant, échelle 2-20 L/h, symbole FI2
- Pompe centrifuge de maintien de la suspension d'alimentation de type immergé, corps et aubage en polypropylène, symbole G1
- Pompe d'alimentation, de type à vis, corps et vis en acier inox AISI 316, débit 200 L/h, symbole G2
- Pompe d'alimentation du coagulant dans le réacteur, à vitesse variable 0-50 L/h de type



à engrenages, corps en AISI 316, symbole G3

- Pompe d'alimentation du floculant à vitesse variable 0-1.5 L/h, de type volumétrique, symbole G4
- Tableau électrique IP55 comprenant le synoptique de l'installation pilote.

## 15.2 Mode opératoire

### 15.2.1 Procédure générale de mise en route

- Relier les tubulures de sortie du pilote à un égout:
- vidange de la cuve d'alimentation
- vidange du décanteur
- sortie de la sur verse du décanteur
- Relier un tuyau souple entre une alimentation de réseau d'eau propre et la cuve d'alimentation de suspension et le pilote
- Brancher le câble d'alimentation électrique du pilote sur une prise monophasée
- Brancher le câble d'alimentation électrique de la pompe de mise en suspension de la cuve d'alimentation sur la prise du pilote
- Vidanger si nécessaire le réservoir DI d'alimentation de la suspension avec la vanne V1
- Laver si nécessaire ce réservoir avec de l'eau propre s'il reste des produits insolubles
- Fermer la vanne de vidange, du réservoir DI d'alimentation de la suspension, V1
- Vidanger si nécessaire le réacteur RI avec la vanne V4
- Laver si nécessaire le réacteur R1 avec de l'eau propre s'il reste des produits insolubles
- Fermer la vanne V4 du réacteur R1
- Vidanger si nécessaire le réacteur R2 avec la vanne V5
- Laver si nécessaire le réacteur R2 avec de l'eau propre s'il reste des produits insolubles
- Fermer la vanne V5 du réacteur R2
- Vidanger si nécessaire le décanteur D4 avec la vanne V8
- Laver si nécessaire cet appareil avec de l'eau propre s'il reste des produits insolubles  
Fermés la vanne V8 de vidange du décanteur D4

- Fermer les vannes V1, V2 partiellement, V4, V5, V8 et V11
- Ouvrir les vannes V3, V9, V10
- Positionner les lamelles dans le décanteur si nécessaire avec l'inclinaison et le nombre préalablement déterminé pour la manipulation:
- Fonctionnement co-courant : le liquide d'alimentation dans le même sens (du haut vers le bas) : les plaques doivent être alors inclinées de la gauche vers la droite
- fonctionnement contre-courant: le liquide d'alimentation va en sens inverse (liquide du bas vers le haut et le solide du haut vers le bas): les plaques doivent être alors inclinées de la droite vers la gauche
- Positionner les vannes V6 et V7 du circuit hydraulique dans la position déterminée pour la manipulation
- fonctionnement Co-courant ou courants parallèles: le liquide d'alimentation doit passer du haut vers le bas du décanteur; la position de la plaque doit éviter que le liquide d'alimentation ne sorte directement du décanteur vers la sur verse de liquide clarifié
- fonctionnement contre-courant ou courants croisés: le liquide d'alimentation doit passer du bas vers le haut du décanteur: la position de la plaque doit éviter que le liquide d'alimentation ne sorte directement du décanteur vers la sur verse de liquide clarifié sans passer par les lamelles
- Mettre en route l'armoire électrique générale avec son bouton "MARCHE": le pilote est prêt pour une manipulation.
- Remplir le réservoir D1 de 250 L d'eau eau à traiter
- Remplir les réacteurs R1 et R2 d'eau propre
- Remplir le décanteur D4 d'eau propre
- Remplir le réservoir D2 avec la solution de coagulant
- Remplir le réservoir D3 avec la solution de floculant
- Mettre en marche la pompe G1
- Mettre en marche la pompe G2
- Positionner les vannes de distribution du décanteur, la vanne V7 ouverte et la vanne V8 fermée, de manière à alimenter celui-ci par le haut
- Positionner la plaque verticale sur le décanteur de manière à empêcher le passage direct du fluide de l'entrée, du décanteur vers la sortie de l'eau clarifiée

- Noter par une méthode d'analyse, matières en suspension, turbidité, concentration de la suspension de départ
- Mettre en route l'agitation du réacteur R1 et du réacteur R2 par lesquels va passer la suspension d'alimentation
- Régler le débit d'alimentation de la suspension à 50-100 L/h
- Mettre en marche la pompe G3
- Régler le débit de la solution de coagulant.
- Mettre en marche la pompe G4
- Régler le débit de la solution de flocculant
- Régler la vitesse de l'agitation du réacteur R1 à 160 tr/min lorsque la suspension s'écoule dans celui-ci de manière à maintenir l'alimentation en suspension
- Régler la vitesse de l'agitation du réacteur R2 à 40 tr/min lorsque la suspension s'écoule dans celui-ci de manière à maintenir l'alimentation en suspension
- Lorsque le réacteur R2 est plein, la suspension déborde par la sur verse et permet l'alimentation du décanteur: déclencher votre chronomètre à cet instant
- Lorsque le décanteur est plein, le liquide clarifié déborde par la sur verse latérale, prenez un échantillon et analysez-le
- Prélever un échantillon à la fin des analyses tous les quarts d'heure par exemple
- Evacuer de temps en temps les boues décantées sans perturber le régime hydraulique du décanteur, vidanger le débit avec des temps de prélèvement faibles, par l'intermédiaire de la vanne V8
- Lorsque la concentration de la solution sortante est constante dans le temps, le pilote est en régime, la manipulation est finie; il convient donc d'arrêter le pilote.

### **15.2.2 Procédure d'arrêt**

- Arrêter la pompe G2 d'alimentation de la suspension
- Arrêter la pompe G1 de mise en suspension de l'alimentation
- Vidanger le réservoir D1 de la suspension avec la vanne V1
- Arrêter la pompe G4 d'alimentation du flocculant
- Arrêter la pompe G3 du coagulant
- Ouvrir la vanne V8 de soutirage du décanteur
- Pendant que le décanteur se vide, il convient d'enlever toutes les plaques inclinées de celui-ci si nécessaire

- Laver ces plaques très soigneusement
- ouvrir la vanne V4 de vidange du réacteur R1 dans le décanteur
- ouvrir la vanne V5 de vidange du réacteur R2 dans le décanteur
- Lorsque le réservoir D1 d'alimentation de la suspension est vide, il est préférable de le laver soigneusement
- Laver le réservoir avec le jet d'eau du tuyau souple d'alimentation d'eau
- Vidanger le réservoir d'alimentation de la suspension de manière à éliminer la plus grosse partie des produits insolubles encore présents dans ce réservoir
- Continuer à remplir la cuve d'alimentation de la suspension avec l'eau propre
- Mettre en marche la pompe G1 de mise en suspension de l'alimentation lorsque le niveau d'eau propre est suffisant, pendant quelques minutes, de manière à nettoyer les circuits intérieurs de la pompe ainsi que le réservoir par brassage
- Arrêter la pompe G1
- Fermer la vanne d'alimentation de l'eau dans le réservoir
- Vidanger à nouveau le réservoir d'alimentation D1 de la suspension de manière à éliminer les produits insolubles encore présents dans ce réservoir
- Recommencer l'opération jusqu'à ce que le réservoir soit parfaitement propre
- Fermer la vanne VI de vidange du réservoir d'alimentation de la suspension
- Remplir alors le réservoir D1 d'alimentation de la suspension d'eau propre jusqu'à la moitié de son volume
- Lorsque le réacteur et le décanteur sont vides, il convient de laver soigneusement les canalisations d'alimentation de la suspension
- Mettre en marche la pompe G1 de mise en suspension de l'alimentation
- Mettre en marche la pompe G2 d'alimentation
- Ouvrir la vanne V2 d'alimentation
- Lorsque de l'eau propre s'écoule de la tubulure d'alimentation de la suspension dans les réacteurs RI et R2, il convient de fermer la vanne de réglage V2
- Arrêter la pompe G2
- Arrêter la pompe G1
- Vidanger le réservoir D1 d'alimentation de la suspension et fermer la vanne V1 de vidange lorsque le réservoir est vide
- Fermer la vanne V8 d'évacuation du décanteur
- Remplir le décanteur avec de l'eau propre pour nettoyer l'appareil

- Ouvrir la vanne V8 d'évacuation du décanteur
- Vidanger le bac de stockage du coagulant par sa vanne de vidange Vil
- Nettoyer le bac du coagulant
- Remplir le bac du coagulant avec de l'eau
- Mettre en marche la pompe G3 d'alimentation du coagulant
- Alimenter l'eau dans la pompe G3 jusqu'à ce que celle-ci ait nettoyé la tubulure d'alimentation du coagulant
- Arrêter la pompe G3
- Vidanger le bac du coagulant de l'eau qu'il contient par sa vanne Vil
- Fermer la vanne de vidange Vil
- Vidanger totalement les réacteurs R1 et R2 et le décanteur D4
- Laver très soigneusement les réacteurs R1 et R2
- Lorsque les réacteurs sont vides fermer les vannes V4 et V5
- Nettoyer le bac de flocculant avec de l'eau propre
- Mettre en marche la pompe G4 d'alimentation du flocculant
- Alimenter l'eau propre dans la pompe G4 jusqu'à ce que celle-ci ait nettoyé le tuyau souple d'alimentation du flocculant
- Arrêter la pompe G4
- Vider le bac de flocculant de l'eau qu'il contient
- Arrêter l'armoire électrique générale avec son bouton "URGENCE": le pilote est propre et prêt pour une nouvelle manipulation.
- 4.3 Arrêt d'urgence

Arrêter l'armoire électrique générale avec son bouton "URGENCE":

## Résumé

Le but de cette étude est la réduction de la turbidité de l'eau, par le procédé de la coagulation floculation. Parmi les coagulants minéraux utilisés et qui a donné un rendement d'élimination important en turbidité, est le  $(Al_2(SO_4)_3)$  de l'ordre de 96.72 % est cela pour les eaux destinées à la consommation.

L'application des coagulants naturels tels que l'Acorn , l'Aloe Vera et le Cactus sous leurs forme en poudre ont donnés une réduction de la turbidité de 49.78% pour les eaux potables et 92.16% pour les eaux usées.

Dans le but d'améliorer l'efficacité des trois coagulants naturels étudiés, un traitement par des solvants a été utilisés parmi lesquels l'eau distillée, chlorure de sodium et Hydroxyde de sodium, qui ont donnés pour l'Aloe Vera, l'Acorn et Cactus les pourcentages d'élimination en turbidité suivants 73.27%, 68.90% et 89.26% respectivement.

De même pour les des eaux usées, Les résultats obtenus après traitement par des solvants ont été aussi très importants. A titre d'exemple l'Aloe Vera traité par l'eau distillée, Cactus traité par NaOH et l'Acorn traité par NaCl ont augmenté le pourcentage de réduction de la turbidité à 93.04%, 94,24% et 89.35% respectivement.

L'application sur un pilote de la coagulation floculation sédimentation montrent que l'utilisation de NaOH, eau distillée et NaCl comme solvant, pour les coagulants Cactus, Aloe Vera et Acorn, le pourcentage d'élimination de la turbidité été autour de 35% pour 30min de décantation.

Les résultats des expérimentations ont permis aussi de mettre en évidence une modélisation du processus de la coagulation floculation, trois paramètres influençant la dose du coagulant ont été considérés, et qui sont la turbidité, le pH et la température. La valeur de l'écart-type ( $\sigma=0.808337$ ) et le coefficient de régression ( $R^2=0.9915$ ), montre que le model du 2<sup>ème</sup> degré est excellente qualité.

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو الحد من التعكر من خلال طريقة التخثر و التلبد , فمن بين المخثرات المعدنية المستخدمة في هذه الدراسة، كبريتات الالومنيوم , حيث بلغت أعلى نسبة في الحد من التعكر عند استعماله ب 96.72 % وذلك بالنسبة للمياه المستعملة للشرب .

تطبيق المخثرات الطبيعية كالبلوط، الألوفيرا والتين الشوكي على شكل مسحوق، أعطت انخفاض في التعكر 49.78 % لمياه الشرب و92.16 % للمياه المستعملة.

ومن أجل تحسين فعالية المخثرات الطبيعية السابقة الذكر تم إستعمال مذيبيات وهي الماء المقطر، كلوريد الصوديوم وهيدروكسيد الصوديوم لكل من الألوفيرا، البلوط و التين الشوكي. فنسبة الحد من التعكر وصلت الى 73.27, 68.90 و 89.26 % على التوالي.

بالنسبة للمياه المستعملة، كانت النتائج أيضا ا جد معتبرة فعلى سبيل المثال نجد الألوفيرا معالج بالماء المقطر، التين الشوكي معالج بهيدروكسيد الصوديوم والبلوط معالج بكلوريد الصوديوم , أدوا الى رفع نسبة الحد من التعكر إلى 93.04, 94.24 و 89.35 % على التوالي.

في حالة إستعمال الجهاز النموذجي للتخثر، التلبد و الترسيب. النتائج المتحصل عليها بينت أنه عند إستخدام هيدروكسيد الصوديوم، كلوريد الصوديوم والماء المقطر كمذيبيات لكل من التين الشوكي، البلوط و الألوفيرا ،نسبة الحد من التعكر كانت في حدود 35 % في زمن ترسب قدره 30 دقيقة.

نتائج التجارب سمحت أيضا من تحديد نموذج لعملية التخثر و التلبد، من أجل ذلك تم التطرق إلى ثلاث معلمات مؤثرة في تركيز المخثر وهي , التعكر، درجة الحموضة و درجة الحرارة . فالقيم العددية كل من الانحراف المعياري ( $\sigma=0.808337$ ) ومعامل الانحدار ( $R^2 = 0.9915$ ) أكدت ان النموذج من الدرجة الثانية ذو نوعية ممتازة.

## **Abstract**

The aim of this study is the reduction of the turbidity by the coagulation flocculation process. Among the inorganic coagulants used and gave an important removal efficiency in turbidity is  $(Al_2(SO_4)_3)$  of about 96.72% is that for drinking water.

The application of natural coagulants such as acorn aloe Vera and cactus in their powdered form they gave a reduction of turbidity of 49.78% for drinking water and 92.16% for wastewater.

In order to improve efficacy of three studied natural coagulants, treatment with solvents was used including distilled water, sodium chloride and sodium hydroxide, which provided for Aloe Vera Acorn and Cactus the following removal percentages turbidity 73.27%, 68.90% and 89.26% respectively.

As well for wastewater, the obtained results after treatment with solvents were also very important. For example Aloe Vera treated with distilled water, Cactus with NaOH and Acorn with NaCl increased the percentage of reduction turbidity to 93.04%, 94.24% and 89.35% respectively.

The application in pilot scale of coagulation flocculation sedimentation show that the use of NaOH, NaCl and distilled water as the solvent for the three coagulant Cactus, Aloe Vera and Acorn, the percentage of turbidity removal was around 35% for a setting time of 30min.

The experimental results permit the modeling of coagulation flocculation process, three parameters affecting the coagulant dose were considered, which are the turbidity, pH and temperature. The value of the standard deviation ( $\sigma=0.808337$ ) and the regression coefficient ( $R^2 = 0.9915$ ) shows that the model of the 2<sup>nd</sup> degree is of excellent quality.