

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان-
Université ABOU BEKR BELKAID



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

MEMOIRE
Projet de Fin d'Etude
Pour l'obtention du diplôme de Master en **Hydraulique**
Option : **Technologies de traitement des eaux**

Thème

**ETUDE COMPARATIVE SUR LE PRETRAITEMENT
DES EAUX DE MER PAR ULTRAFILTARTION ET
COAGULATION FLOCCULATION**

Soutenue publiquement le 05 / 10 / 2013

Présenté par

M^{elle} SEFRAOUI MALIKA

Devant le jury :

M^R HABI Mohammed

Président

M^R ROUISSAT Bouchrit

Examineur

M^R TERKI HESSAINE Taha El Amine

Examineur

M^R CHIBOUB FELLAH Abdelghani

Encadreur

M^R BOUMEDIENE Maamar

Encadreur

Promotion 2012/2013

DEDICACES

*Tout d'abord je remercie ALLAH qui ma donné
la force, le courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.
J'adresse mes remerciements par un grand respect et gratitude*

A mes très chers parents,

*qui sont la lumière de ma vie, qui ont tant souffré et sacrifiés
pour que je sois heureuse, pour leurs conseils,
leur affection et leurs encouragements*

Et je le dédie :

A mes très chers frères ;

A mes très chères sœurs ;

A tous mes autres proches ;

A mes chers amis chacune par son nom ;

*ainsi qu'à tous ceux qui me connaissent ; qui ma aidé et qui sont
toujours présent à mes côtés, avec qui j'ai partagé le bon et le
mauvais,*

A tous ma promotion de TTE 2012/2013 ;

Tous simplement, a tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

MALIKA

Remerciements

Toute mon gratitude et remerciement vont à Allah, le clément et le miséricordieux qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail que je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes ayant contribuées de près ou de loin à l'élaborer.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mes encadreur **Mr A.CHIBOUB FELLAH** « Professeur au Département d'Hydraulique » et **Mr M. BOUMEDIENNE** « Maitre assistant classe (A) au Département d'Hydraulique» pour la sollicitude avec laquelle ils ont suivi et guidé ce travail.

Mes vives gratitudes et remerciement vont aussi à **Mr M. HABI** «Professeur au Département d'Hydraulique », pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury de ce mémoire et de bien vouloir l'examiner.

J'adresse mes profonds remerciements **Mr B. ROUISSAT** « Maitre assistant classe (A) au Département d'Hydraulique» et **Mr T.A.TERKI HASSAINE** « Maitre assistant classe (A) au Département d'Hydraulique»

Je remercie également les responsables et agents de laboratoire de « traitement et d'épuration des eaux » au niveau de la faculté et laboratoire de « Sekkak » qui m'ont beaucoup aidé aux cours des expériences.

J'exprime ma gratitude à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis l'école primaire jusqu'aux études universitaires.

Un grand merci à toute personne nous' ayant aidée et guidée pour la réalisation de Cette étude.

Résumé

Les exigences en terme de qualité d'eau potable étant de plus en plus élevées, la qualité de cette eau est étroitement liée au prétraitement. Le prétraitement, qui a pour but de fournir une qualité satisfaisante d'eau prétraitée, est nécessaire afin de mettre en œuvre avec succès les procédés de dessalement. Cette dernière dépend notamment de la nature et de la quantité des matières en suspension contenus dans l'eau.

La démarche adoptée dans cette étude consiste à comparer différents procédés de prétraitement : la coagulation floculation et décantation d'une part et l'ultrafiltration d'autre part dans différentes conditions opératoires. Pour cela, Différente essais et d'analyses sont effectuées au laboratoire et à l'échelle pilote (TE300, TE600) ont été conduits avec une eau salée turbide (préparée) afin de suivre tous les paramètres caractérisant la qualité des eaux avant et après chaque étape pour montrer les différentes paramètres influant sur les techniques précédemment citées. Quel est le procédé de prétraitement concerné (procédé membranaire UF seule ou procédé conventionnelle coagulation floculation et décantation) ?

Mots clés : prétraitement conventionnelle, prétraitement membranaire, coagulation-floculation décantation, matières en suspension, Jar-Test, turbidité, sulfate d'alumine, bentonite, ultrafiltration.

Abstract

The requirements in terms of quality of drinking water is increasingly high, the quality of this water is closely related to pretreatment. Pretreatment, which provide a satisfactory pretreated water quality goal, is required to successfully implement desalination processes. The latter depends particularly on the nature and the amount of suspended solids in the water.

The approach taken in this study is to compare different pretreatment processes: coagulation flocculation and settling on the one hand and on the other hand ultra filtration in different operating conditions. To do this, Different testing and analysis are performed in the laboratory and pilot scale (TE300, TE600) were conducted with a salt water turbid (prepared) to follow all the parameters that characterize the quality of water before and after each step to show the different parameters affecting the above-mentioned techniques. What is the process involved pretreatment (UF membrane process alone or conventional coagulation flocculation and settling process)?

Keywords: conventional pretreatment, membrane pretreatment, coagulation-flocculation decantation, suspended solids, Jar-test, turbidity, aluminum sulfate, bentonite, ultra filtration.

Liste des abréviations

ADE	: Algérienne Des Eaux
alun	: Sulfate d'aluminium
B.C.I	: Bentonite Charge Industrielle
CAP	: Charbon Actif en Poudre
CFD	: Coagulation Flocculation Décantation
C_c	: Concentration du Coagulant
C_f	: Concentration du Flocculant
C_a	: Concentration en sels dissous dans l'eau d'Alimentation
C_p	: Concentration en sels dissous dans le Perméat
Da	: Dalton
Hyd	: Hydraulique
MES	: Matière En Suspension
MF	: Micro Filtration
μm	: Micromètre
MFI	: Modified Fouling Index
MO	: Matière Organique
NF	: Nano Filtration
Nm	: Nanomètre
NTU	: Unité Néphélométrique de Turbidité
OI	: Osmose Inverse
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
Pa	: Pascal
π	: Pression Osmotique
pH	: Potentiel d'Hydrogène
ppm	: Partie Par Million
ΔPM	: Pression Transmembranaire Moyenne
Q_a	: Débit d'Alimentation
Q_c	: Débit de Concentrat
Q_p	: Débit de Perméat
R	: Rendement
SDI	: Silt Density Index
T	: Température
TR	: Taux de Rejet ou Taux de Rétention
tr/min	: tour/minute
UF	: Ultra Filtration
Y	: Taux de conversion

Liste des photos

Photos N° 01	: Pilote de coagulation-floculation et décantation (TE 600)	57
Photos N° 02	: Le Jar-Test (floculateur 11197)	59
Photos N° 03	: Le "Jar-Test"(ISCO IDH3A000)	60
Photos N° 04	: Turbidimètre	61
Photos N° 05	: pH-mètre	62
Photos N° 06	: Conductimètre	62
Photos N° 07	: Les éprouvettes	63
Photos N° 08	: Les Béchers	63
Photos N° 09	: Erlenmeyer	63
Photos N° 10	: Fioles jaugés	63
Photos N° 11	: Balance électronique	63
Photos N° 12	: Pilote d'ultrafiltration (TE 300)	69

Liste des tableaux

PARTIE A

Tableau I.1	: Classification des eaux selon la salinité	05
Tableau I.2	: Les normes des substances indésirables	07
Tableau I.3	: Les normes des substances toxiques	07
Tableau I.4	: Les différents colmatages possibles	11
Tableau II.1	: Types de Filtration	22
Tableau II.2	: Objectif du techniques séparatives à membranes	25
Tableau II.3	: Valeurs repère du SDI	36
Tableau III.1	: Dérivés des sels d'aluminium et de fer	46
Tableau III.2	: Sulfate d'aluminium et leur concentration	47
Tableau III.3	: Le temps mis par ces particules pour chuter naturellement d'un mètre dans l'eau	50

PARTIE B

Tableau I.1	: Types d'appareillages utilisés pour les différentes analyses	60
Tableau I.2	: Classe de turbidités usuelles (NTU)	61
Tableau III.1	: Caractéristiques de l'eau utilisée	81
Tableau III.2	: Les caractéristiques physico- chimiques de l'eau à traiter	81
Tableau III.3	: La variation de la turbidité en fonction du temps de décantation (Pour 38g/l de sel et 0.1g/l de B.C.I).	84
Tableau III.4	: La variation de la turbidité en fonction du temps de décantation (Pour 38g/l de sel et 1 g/l de B.C.I).	84
Tableau III.5	: La variation de la turbidité en fonction du temps de décantation (Pour 38g/l de sel et 3 g/l de B.C.I).	84
Tableau III.6	: Réduction de la turbidité pour différents temps de décantation pour une eau salée turbide (0.1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	86
Tableau III.7	: Réduction de la turbidité pour différents temps de décantation pour une eau salée turbide (1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	86
Tableau III.8	: Réduction de la turbidité pour différents temps de décantation pour une eau salée turbide (3 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	86
Tableau III.9	: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate	88

	d'alumine pour une eau salée turbide (0.1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	
Tableau III.10	: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d'alumine pour une eau salée turbide (0.1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	89
Tableau III.11	: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d'alumine pour une eau salée turbide (0.5 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	90
Tableau III.12	: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d'alumine pour une eau salée turbide (1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	90
Tableau III.13	: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d'alumine pour une eau salée turbide (2 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	91
Tableau III.14	: L'influence de la concentration de polymère sur la coagulation floculation d'une eau salée turbide (0.1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	100
Tableau III.15	: L'influence de la concentration de polymère sur la coagulation floculation d'une eau salée turbide (0.5 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	101
Tableau III.16	: L'influence de la concentration de polymère sur la coagulation floculation d'une eau salée turbide (1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	101
Tableau III.17	: L'influence de la concentration de polymère sur la coagulation floculation d'une eau salée turbide (2 g/l B.C.I et 38g/l de sel)	102
Tableau III.18	: La turbidité avec et sans floculant pour 0.1 g/l de B.C.I.	105
Tableau III.19	: Réduction de la turbidité pour différentes vitesses rapide durant la coagulation	106
Tableau III.20	: Réduction de la turbidité pour différents temps d'agitation rapide durant la coagulation	107
Tableau III.21	: Réduction de la turbidité pour différentes vitesses durant la floculation	109
Tableau III.22	: Réduction de la turbidité pour différents temps d'agitation lente durant la floculation	109
Tableau III.23	Réduction de la turbidité pour différents temps de décantation	112
Tableau III.24	: L'influence de la turbidité de l'eau sur la coagulation floculation	112
Tableau III.25	: L'influence de la turbidité de l'eau sur la coagulation floculation	113
Tableau III.26	: L'influence du type de décantation (pour un débit fixe =40 l/h).	114
Tableau III.27	: Evolution des paramètres physico-chimique en fonction du débit pour un seul type de décantation (Co-courant):	115
Tableau III.28	: Caractéristiques de la membrane d'ultrafiltration	121

Tableau III.29	: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (1.5bar)	122
Tableau III.30	: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 1.5 bar)	122
Tableau III.31	: Evolution des paramètres physicochimique de concentrât (Pour une pression d'entrée de 1.5 bar)	122
Tableau III.32	: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (2 bar)	123
Tableau III.33	: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 2 bar)	123
Tableau III.34	: Evolution des paramètres physicochimique de concentrât (Pour une pression d'entrée de 2 bar)	123
Tableau III.35	: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (2.5 bar)	124
Tableau III.36	: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 2.5 bar)	124
Tableau III.37	: Evolution des paramètres physicochimique de concentrât (Pour une pression d'entrée de 2.5 bar)	125
Tableau III.38	: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (3 bar)	125
Tableau III.39	: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 3 bar)	125
Tableau III.40	: Evolution des paramètres physicochimique de concentrât (Pour une pression d'entrée de 3 bar)	125
Tableau III.41	: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (3.5 bar)	126
Tableau III.42	: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 3.5 bar)	126
Tableau III.43	: Evolution des paramètres physicochimique de concentrât (Pour une pression d'entrée de 3.5 bar)	126
Tableau III.44	: La variation du taux de conversion pour les différentes pressions.	127
Tableau III.45	: Tableau comparatif des différentes techniques	143

Liste des figures

PARTIE A

Figure I.1	: Montage de distillation	10
Figure I.2	: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	10
Figure I.3	: Schéma général d'une installation de dessalement	11
Figure I.4	: Prétraitements conventionnels à l'osmose inverse	12
Figure I.5	: Position de l'ultrafiltration dans la filière de traitement	15
Figure I.6	: Station de dessalement de Souk Tleta.	16
Figure I.7	: Système d'ultrafiltration	16
Figure I. 8	: Système d'osmose inverse	16
Figure I.9	: Vue générale de la station de dessalement de Ténès	17
Figure I.10	: Tuyau de captage	17
Figure I.11	: Décanteur lamellaire	18
Figure I.12	: Filtration de sécurité, pompe haute pression et turbine de récupération	19
Figure I.13	: Le système de membrane d'osmose inverse	20
Figure II.1	: Microfiltration	22
Figure II.2	: Ultrafiltration	23
Figure II.3	: Nano filtration	23
Figure II.4	: Osmose inverse	23
Figure II.5	: Les particules retenues à la surface des membranes UF	25
Figure II.6	: Comparaison entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration	26
Figure II.7	: Une installation d'ultrafiltration	26
Figure II.8	: Principe de fonctionnement d'une membrane semi-perméable	27
Figure II.9	: Description des différents types de membrane	28
Figure II.10	: Module tubulaire	30
Figure II.11	: Module à plaque	30
Figure II.12	: Module spiralé	31
Figure II.13	: Types de filtration	31
Figure II.14	: Schéma de principe de la filtration tangentielle	31
Figure II.15	: Schéma de principe de la filtration frontale	32
Figure II.16	: Comparaison entre filtration frontale et filtration tangentielle	32
Figure II.17	: Caractérisation de la sélectivité d'une membrane d'ultrafiltration	34
Figure II.18	: Schématisation des différents mécanismes de colmatage en UF	35
Figure II.19	: Techniques de nettoyage des membranes	37
Figure III.1	: Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électronégative	40
Figure III.2	: Effet de la distance entre deux particules colloïdales	41
Figure III.3	: Potentiel zêta en fonction de l'éloignement de la particule	41
Figure III.4	: Processus de coagulation, floculation et de sédimentation	42
Figure III.5	: Coagulation-floculation	43
Figure III.6	: Agglomération des floes	48
Figure III.7	: Décanteur simple	51

Figure III.8	: Décantation	52
Figure III.9	: Décanteur à lamelle	52
Figure III.10	: Décanteur à contre courant	53
Figure III.11	: Décanteur à courant croisés	53
Figure III.12	: Décanteur à cocourant	53

PARTIE B

Figure I.1	: Construction du pilote TE600	56
Figure I.2	: Liste des vannes du pilote TE600	58
Figure I.3	: Construction du pilote TE300	65
Figure I.4	: Instrumentation du pilote TE300	66
Figure I.5	: Liste des vannes du pilote TE300	67
Figure I.6	: Schéma de principe de l'UF	68
Figure III.1	: Variation de la turbidité en fonction de B.C.I avant traitement	82
Figure III.2	Variation du pH en fonction de la concentration de B.C.I. avant traitement	82
Figure III.3	Représentation d'une solution ([Na Cl]=38g/l+ 3g/l de B.C.I) dans un bécher de 1l après 4 heures de décantation.	83
Figure III.4	: Décantation naturelle de la B.C.I zone d'eau clarifiée	85
Figure III.5	: Décantation avec la Cc optimal de chaque dose de la B.C.I en fonction de temps	87
Figure III.6	: Les étapes suivies pour l'obtention de la dose optimale du coagulant	88
Figure III.7	: L'influence de la dose du sulfate d'alumine sur la coagulation floculation	93
Figure III.8	: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 0.1 g/l de B.C.I	96
Figure III.9	: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 0.5 g/l de B.C.I	96
Figure III.10	: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 1 g/l de B.C.I.	96
Figure III.11	: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 2 g/l de B.C.I.	97
Figure III.12	: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 3 g/l de B.C.I.	97
Figure III.13	: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 0.1 g/l de B.C.I	98
Figure III.14	: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 0.5 g/l de B.C.I	98
Figure III.15	: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 1 g/l de B.C.I	98
Figure III.16	: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des	99

	concentrations du coagulant pour une concentration de 2 g/l de B.C.I	
Figure III.17	: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 3 g/l de B.C.I	99
Figure III.18	: Les étapes suivies pour l'obtention de la dose optimale du flocculant	100
Figure III.19	: L'influence de la dose du mélange (sulfate d'alumine/ polymère) sur la coagulation floculation	104
Figure III.20	: La turbidité avec et sans flocculant	105
Figure III.21	: Le pourcentage de réduction de la turbidité avec et sans flocculant	106
Figure III.22	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité après pour les différentes vitesses rapide durant la coagulation	108
Figure III.23	: Courbe expérimentale de la turbidité après en fonction du temps d'agitation rapide durant la coagulation	108
Figure III.24	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité après pour différentes vitesses lente durant la floculation	110
Figure III.25	: Courbe expérimentale de la turbidité après en fonction du temps d'agitation lente durant la floculation	110
Figure III.26	: La variation du pH après en fonction de la vitesse d'agitation	111
Figure III.27	: La variation de la conductivité après en fonction de la vitesse d'agitation.	111
Figure III.28	: Variation de la turbidité après en fonction du temps de décantation	112
Figure III.29	: Variation de la dose optimale de coagulant en fonction de la B.C.I	113
Figure III.30	: Variation de la dose optimale du flocculant en fonction de B.C.I	113
Figure III.31	Variation de la turbidité en fonction du type de décantation	115
Figure III.32	Variation de la turbidité en fonction du débi (décantation à Co-courant)	116
Figure III.33	: L'influence de types de décantation	118
Figure III.34	: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 1.5 bar)	128
Figure III.35	: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 2 bar)	128
Figure III.36	: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 2.5 bar)	128
Figure III.37	: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 3 bar)	129
Figure III.38	: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 3.5 bar)	129
Figure III.39	: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour différentes pressions	130
Figure III.40	: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 1.5 bar)	130
Figure III.41	: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 2bar)	130
Figure III.42	: Variation de la pression de perméat en fonction de débit	131

	d'alimentation pour ($P_e = 2.5$ bar)	
Figure III.43	: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar)	131
Figure III.44	: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar)	131
Figure III.45	: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 1.5$ bar)	132
Figure III.46	: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2$ bar)	132
Figure III.47	: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2.5$ bar)	132
Figure III.48	: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar)	133
Figure III.49	: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar)	133
Figure III.50	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 1.5$ bar)	133
Figure III.51	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2$ bar)	134
Figure III.52	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2.5$ bar)	134
Figure III.53	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar)	134
Figure III.54	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar)	135
Figure III.55	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 1.5$ bar)	136
Figure III.56	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2$ bar)	136
Figure III.57	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2.5$ bar)	136
Figure III.58	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar)	137
Figure III.59	: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar)	137
Figure III.60	Variation de taux de conversion en fonction de rendement (1.5bar)	139
Figure III.61	Variation de taux de conversion en fonction de rendement (2bar)	139
Figure III.62	Variation de taux de conversion en fonction de rendement (2.5bar)	139
Figure III.63	Variation de taux de conversion en fonction de rendement (3 bar)	140
Figure III.64	Variation de taux de conversion en fonction de rendement (3.5bar)	140

Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------	----

Partie A :

Chapitre I : Généralités sur l'eau et les procédés de traitement

I.1. Introduction	03
I.2. "L'or bleu" c'est la vie	03
I.2.1. Les ressources de l'eau dans la nature	03
I.2.1.1. Les eaux de pluie	03
I.2.1.2. Eaux de surface	04
I.2.1.3. L'eau souterraine	04
I.2.1.4. Les eaux de mer et les eaux saumâtres	04
I.2.2. Les paramètres de l'eau potable	05
I.2.2.1. Les paramètres organoleptiques	05
I.2.2.2. Les paramètres physico-chimiques	06
I.2.2.3. Les paramètres indésirables	06
I.2.2.4. Les paramètres toxiques	07
I.2.2.5. Les paramètres microbiologiques	07
I.2.3. Les normes physico-chimiques de l'eau potable	07
I.3. Eaux brutes et les processus de potabilisation	07
I.3.1. Le prétraitement des eaux de consommation	08
I.3.2. Traitement physico-chimique	08
I.3.3. Traitement de finition	08
I.3.4. Amélioration des eaux potables	08
I.3.4.1. La déminéralisation	09
I.4. La mer à boire	09
I.5. Eau de mer pour eau potable	09
I.5.1. Différents procédés de dessalement	09
I.5.1.1. La distillation	10
I.5.1.2. L'osmose inverse	10
I.5.2. Les installations de dessalement de l'eau de mer	11
I.5.2.1. La prise d'eau	11

I.5.2.2. Procédés de prétraitement	11
I.5.2.3. Installation de dessalement	15
I.5.2.4. Le post-traitement	15
I.6. Quelques stations utilisant la coagulation-floculation et la filtration membranaire comme prétraitement de l'eau de mer	15
I.6.1. Station de dessalement de Souk Tleta	16
I.6.1.1. Description de la station	16
I.6.2. Station de dessalement de Ténès	17
I.6.2.1. Présentation de l'unité de dessalement de l'eau de mer	17
I.6.2.2. Présentation de l'unité	17
I.6.2.3. Captage et pompage de l'eau brute	17
I.6.2.4. Prétraitement de l'eau brute	18
I.6.2.5. Equipement osmose inverse	19
I.6.2.6. Poste traitement	20
I.7. Conclusion	20

**Chapitre II : Une nouvelle application pour l'ultrafiltration:
prétraitement au dessalement de l'eau de mer**

II.1. Introduction	21
II.2. Les techniques membranaires	21
II.2.1. Microfiltration	22
II.2.2. L'ultrafiltration pour la production d'eau potable	22
II.2.3. Nano filtration	23
II.2.4. L'osmose inverse	23
II.3. L'ultrafiltration	24
II.3.1. Historique	24
II.3.2. Généralités	24
II.3.2.1. L'ultrafiltration pour tous types d'eau	24
II.3.3. Objectifs de l'ultrafiltration	24
II.3.3. 1. L'ultrafiltration pour clarifier	25
II.3.3. 2. L'ultrafiltration pour désinfecter	25
II.3.3. 3. L'ultrafiltration pour concentrer	25
II.3.4. Principe	25
II.3.5. Comparaison entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration	26
II.3.6. Le bon fonctionnement d'une installation UF	26

II.3.7. Les applications de l'ultrafiltration	27
II.3.8. Généralités sur les membranes	27
II.3.8.1. Définition de la membrane	27
II.3.8.2. Classification des membranes	27
II.3.8.3. Durée de vie d'une membrane	29
II.3.8.4. Protection des membranes	29
II.3.9. Les modules membranaires	29
II.3.9.1. Définition des modules	29
II.3.9.2. Types de modules	29
II.3.10. Types de filtration	31
II.3.10.1. Filtration tangentielle	31
II.3.10.2. Filtration frontale	32
II.3.11. Choix du type de module, de membrane	33
II.3.11.1. Choix du type de module	33
II.3.11.2. Choix du type de membrane	33
II.3.12. Les paramètres caractéristiques membrane UF	33
II.3.12.1. La sélectivité	34
II.3.12.2. Notion de seuil de coupure	34
II.3.12.3. Perméabilité	35
II.3.13. Phénomènes de colmatage	35
II.3.13.1. Mécanismes de colmatage en UF	35
II.3.13.2. Estimation du potentiel de colmatage	36
II.3.13.3. Prévention du colmatage	36
II.3.14. Techniques de nettoyage des membranes	37
II.4. Conclusion	37

Chapitre III : Théorie de la coagulation- floculation et décantation

III.1. Introduction	38
III.2. Les particules en suspension	38
III.3. Nature et propriétés des colloïdes	39
III.3.1. Les types de colloïdes	39
III.3.1.1. Les colloïdes hydrophiles	39
III.3.1.2. Les colloïdes hydrophobes	39
III.3.2. La théorie de la double couche	39

III.3.3. Le potentiel Zêta	41
III.4. Coagulation floculation	42
III.4.1. Définition	42
III.4.2. Technologie de la coagulation- floculation	42
III.4.2.1. Stratégie	42
III.4.2.2. Choix du coagulant et/ ou floculant	43
III.4.2.3. Application dans le traitement des eaux	43
III.4.3. La coagulation	44
III.4.3.1. Principe	44
III.4.3.2. Mécanismes de la coagulation	44
III.4.3.3. Paramètres liés à la coagulation	44
III.4.3.4. Coagulant et processus de coagulation	46
III.4.3.5. Mise en solution d'un coagulant	47
III.4.4. Floculation	48
III.4.4.1. But	48
III.4.4.2. Les types de floculation	48
III.4.4.3. Floculants et processus de floculation	48
III.5. La décantation	49
III.5.1. Principe de la décantation	50
III.5.2. Types de décantation	50
III.5.2.1. Décantation de particules grenues (discrètes)	50
III.5.2.2. Décantation de particules floculantes	51
III.5.2.3. Décantation freinée	51
III.5.2.4. Décantation en compression de boues	51
III.5.3. Les types de décanteur	51
III.5.3.1. Décanteur simple	51
III.5.3.2. Décanteur lamellaire	52
III.5.4. Problèmes liés à la décantation	54
III.5.5. La mise en œuvre de la clarification par coagulation-floculation et décantation	54
III.5.5.1. La clarification totale	54
III.5.5.2. La clarification partielle	54
III.6. Conclusion	54

Partie A :

Chapitre I : Description des bancs d'essais et les appareillages de mesure

I.1. Coagulation-floculation et décantation	55
I.1.1. Introduction	55
I.1.2. Description des bancs d'essai	55
I.1.2.1. Description du pilote TE600	55
I.1.2.2 : Description d'appareil du « Jar- Test »	59
I.1.3. Analyse des eaux	60
I.1.4. Matériels utilisés	60
I.1.4.1. Appareillage de mesure	60
I.1.4.2. Verreries	63
I.1.4.3. Autres	63
I.2. Ultrafiltration	64
I.2.1. Description du pilote TE 300	64
I.2.1.1. Objectif pédagogique	64
I.2.1.2. Construction	64
I.2.1.3. Instrumentation	65
I.2.1.4 : Liste des vannes	66
I.2.2 : Manipulation	67
I.2.2.1 : Objectif	67
I.2.2.2 : Préliminaires	68
I.2.2.3 : Principe	68

Chapitre II: Mode d'opérateur expérimental

II.1. Etude expérimentale de la CFD	70
II.1.1. Les objectifs du travail	70
II.1.2. Manipulation	70
II.1.3. Mode opératoire d'essai en Jar-Test	71
II.1.3. 1. Mode opératoire de l'influence de concentration de coagulant	71
II.1.3. 2. Mode opératoire de l'influence de concentration de floculant	71
II.1.3. 3. Mode opératoire de l'influence de la vitesse et de la durée d'agitation	72
II.1.3. 4. Mode opératoire de l'influence de la turbidité de l'eau	73
II.1.3. 5. Etude cinétique : Décantabilité naturelle (sans produits)	73

II.1.4. Mode opératoire de la coagulation-floculation et décantation sur le pilote	74
II.1.4. 1. La coagulation- floculation et décantation lamellaire Co-courant	74
II.1.4. 2. La coagulation- floculation et décantation lamellaire Contre-courant	75
II.1.4. 3. La coagulation- floculation et décantation classique	75
II.1.5. Les réactifs utilisés	76
II.1.5.1. Le réactif coagulant	76
II.1.5.2. Le réactif flocculant	76
II.1.5.3. La bentonite	76
II.1.6. Préparation des solutions	77
II.1.6.1. Préparation du coagulant (sulfate d'aluminium)	77
II.1.6. 2. Préparation du flocculant	78
II.1.6. 3. Calcul pour le bac d'alimentation	79
II.2. Etude expérimentale de l'ultrafiltration	80
II.2.1. Application de l'ultrafiltration pour une solution salée et turbide	80
II.2.1.1 : Le but	80
II.2.1.2. Mode opératoire	80
II.2.1.3. Rinçage du module	80

Chapitre III : Résultats expérimentaux et interprétation

III.1. Etude expérimentale de la coagulation-floculation et décantation	81
III.1.1. Introduction	81
III.1.2. Caractéristiques de l'eau utilisée	81
III.1.3. Caractéristiques de l'eau à traiter	81
III.1.3. 1. Effet de B.C.I sur la turbidité et le pH d'une eau salée	82
III.1.4. Décantabilité naturelle et essais de Jar-test	83
III.1.4.1. Décantabilité naturelle (sans produits) : étude cinétique	83
III.1.4.2. Essais de Jar-Test	83
III.1.5. Résultats expérimentaux et interprétation	83
III.1.5.1. Etude cinétique	83
III.1.5.2. Détermination de la concentration optimale de coagulant	87
III.1.5.3. Détermination de la concentration optimale de flocculant	99
III.1.5.4. L'influence de la vitesse et durée d'agitation	106
III.1.5.5. La variation de la dose optimum de coagulant / flocculant en fonction de la	112

qualité de l'eau brute	
III.1.5.6. Résultats expérimentaux d'application de la CFD sur le pilote	113
III.1.6. Conclusion	119
III.2. Etude expérimentale de l'ultrafiltration	120
III.2.1. Introduction	120
III.2.2. La membrane d'ultrafiltration	120
III.2.3. Résultats expérimentaux de l'étude du pilote	121
III.2.3.1. Etude de la rétention globale du module	121
III.2.3.2. Paramètres de suivi des performances hydrauliques	127
III.2.4. Représentation graphiques et interprétation	128
III.2.4.1. Effet de débit d'alimentation sur le débit de perméat	128
III.2.4.2. Effet de débit d'alimentation sur la pression de perméat	130
III.2.4.3. Effet de débit d'alimentation sur la pression de concentrât	132
III.2.4.4. Effet de débit d'alimentation sur la turbidité de perméat	133
III.2.4.5. Effet de débit d'alimentation sur la turbidité de concentrât	136
III.2.5. Détermination des conditions optimales d'un procédé d'ultrafiltration	138
III.2.6. Variation des différents paramètres	138
III.2.6.1. Le pH	138
III.2.6.2. La conductivité	138
III.2.6.3. La température	138
III.2.7. La variation du taux de conversion	139
III.2.8. Conclusion	140
III.3. Comparaison	141
Conclusion générale	144

L'eau, est la source précieuse dans le monde, elle joue un rôle principal dans le développement de l'humanité. La vie humaine, animale, et végétale en dépend [1].

Pour cela, son importance croît d'une manière très accélérée. Son approvisionnement devient de plus en plus difficile [2].

Les eaux captées dans la nature ne présentent souvent pas les qualités physiques, chimiques et biologiques désirables, propres à la consommation. C'est le rôle du traitement qui leur confère les propriétés souhaitables [3].

Etant donné la croissance démographique et la demande en eau plus en plus forte, tous les pays et plus particulièrement, ceux du sud, auront à plus au moins brève échéance, à faire face aux problèmes de l'eau. Parmi les solutions requises pour remédier à ces problèmes, plusieurs techniques ont été développées [1].

Sur la planète il y'a suffisamment d'eau pour satisfaire nos besoins, cependant 97% de ces eaux sont des eaux salées. Le reste de l'eau 3%, représente les eaux conventionnelles, qui sont très mal réparties sur la terre et souvent sources des guerres entre les peuples [4].

Par conséquent, des solutions telles que la réutilisation d'eau et le dessalement d'eau salée, qui représentent la très grande majorité de l'eau disponible sur terre, deviennent des solutions clés, répondant en outre aux exigences du développement durable [5].

Le dessalement de l'eau est considéré comme une technique aussi ancienne que la terre elle-même, en effet, le cycle naturel de l'eau, qui consiste à une évaporation à partir des océans et des mers suivie d'une condensation de la vapeur ainsi formée donnant de l'eau douce qui tombe sous forme de pluies et de chutes de neige, est considéré comme le plus grand système de dessalement sur terre [6].

Le prétraitement avant osmose inverse, qui a pour but de réduire le potentiel de colmatage de l'eau à traiter et de fournir une qualité satisfaisante d'eau prétraitée, est nécessaire afin de mettre en œuvre avec succès les procédés de dessalement d'eau de mer.

Le prétraitement conventionnel, largement utilisé dans les usines de dessalement actuellement en opération est basé sur des séparations physico-chimiques (coagulation floculation).

Du fait de la baisse du prix des membranes et de la dégradation constante de la qualité des ressources en eau, le prétraitement par procédé membranaire trouve de plus en plus sa place dans les étapes de prétraitement avant osmose inverse.

Parmi les procédés membranaires à basse pression, l'ultrafiltration (UF) est préférentiellement utilisée pour le prétraitement avant osmose inverse : les membranes d'UF

représentent probablement le meilleur compromis entre abattement des contaminants particuliers et productivité de perméat [5].

Notre étude a donc pour but d'améliorer la qualité de ces eaux à un seuil acceptable en tenant compte des normes pratiquées.

L'objectif essentiel de notre travail est la détermination des conditions et des traitements adéquats (faire une comparaison entre CFD et UF dans le traitement des eaux salées), en vue de voir l'efficacité de CFD pour l'élimination ou la diminution des MES d'une eau salée.

Nous allons d'abord rechercher la concentration optimale du coagulant et du floculant utilisé à l'aide d'un Jar-Test ; ensuite appliquer les résultats obtenus sur le pilote de coagulation floculation et décantation « TE600 », qui est considéré comme une petite station. La seconde partie porte sur l'étude du procédé d'ultrafiltration pour une solution de forte concentration en NaCl. Les expérimentations sur le pilote « TE300 » permettront de vérifier la performance de la membrane.

L'importance de l'étape de prétraitement a permis de juger légitime de faire une étude expérimentale, en tenant compte de la qualité de l'eau, à partir des manipulations comparatives entre la coagulation- floculation décantation et l'ultrafiltration.

Pour ce faire, ce présent travail est subdivisé principalement en deux parties :

Une partie théorique comportant trois grands chapitres :

- ❖ Le chapitre I donne un aperçu général sur l'eau et les différentes procédures de traitement.
- ❖ Le chapitre II donne une nouvelle application pour l'UF: prétraitement au dessalement de l'eau de mer.
- ❖ Le chapitre III donne une vue générale sur le phénomène de CFD.

La seconde partie de l'étude est axée sur l'expérimentation et elle est présentée également en trois chapitres.

- ❖ Les chapitres I et II sont consacrés à la description et au fonctionnement des bancs d'essais, les appareillages de mesure et le mode opératoire.
- ❖ Le chapitre III concerne l'optimisation des conditions. Des essais en laboratoire ont fixé les conditions optimales du déroulement de chaque phase de traitement pour interpréter les résultats expérimentaux enregistrés, et pour faire une comparaison entre la CFD et UF.
- ❖ Et enfin, une conclusion est donnée pour résumer le fruit de notre travail.

Partie A :

Partie théorique

Chapitre I

*Généralités sur l'eau et les
procédés de traitement*

CHAPITRE I**Généralités sur l'eau et les procédés de traitement****I.1. Introduction :**

L'eau est l'élément vital pour le bien des êtres vivants, dont l'être humain. Cette perle de vie recouvre près des trois quart de la superficie de la terre, mais la fraction douce ne représente que 3%. La demande en eau douce est toujours en croissance au niveau mondial et devient de plus en plus supérieure aux ressources [7].

Les besoins actuels ne sont assurés que par le recours à d'autres sources en eau, telles que les eaux superficielles, les eaux de mer et les eaux saumâtres qui sont plus au moins polluées et salées [8].

Le traitement à appliquer aux eaux destinées à l'alimentation humaine consiste à transformer une eau brute qu'elle que soit son origine en une eau potable convenable à la consommation, et cela en se débarrassant de toutes les matières en suspension et colloïdales qu'elles contiennent ainsi que de certaines substances dissoutes [9].

Pour ce faire, il est généralement nécessaire de combiner plusieurs opérations élémentaires mettant en œuvre des phénomènes physiques, chimiques et biologiques. La tendance actuelle est orientée vers la conception de lignes de traitements successifs bien adaptées à chaque cas [10].

I.2. "L'or bleu" c'est la vie :

L'eau est le sang de la terre, une source de nourriture, un moyen d'hygiène, une voie de transport.

L'eau est la matière la plus précieuse dans le monde. Toutes les civilisations anciennes ont été construites autour des sources d'eau, alors si notre planète est appelée planète bleue c'est qu'elle est constituée à 71% d'eau [11].

I.2.1. Les ressources de l'eau dans la nature :

On retrouve quatre sources principales d'eaux brutes : les eaux de pluie, les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux de mer [12].

I.2.1.1. Les eaux de pluie :

Théoriquement, les eaux de pluie sont des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine en ajoutant bien sûr à ces eaux les éléments nécessaires pour qu'elles deviennent potables tels que les sels minéraux. Ces eaux peuvent être contaminées par des poussières atmosphériques [13].

I.2.1.2. Eaux de surface :

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...) [14].

Elles contiennent en général une grande quantité de solides en suspension (variables selon la pluviométrie), bactéries, algues et matières organiques, sources de mauvais goût et de mauvaises odeurs et des maladies hydriques.

- La température de ces eaux varie en fonction du climat et de ses saisons.
- Sa composition en sels minéraux est variable en fonction du terrain et des rejets [15].

I.2.1.3. L'eau souterraine :

L'eau souterraine est l'eau qui existe dans les pores, les fissures des roches et dans les sédiments sous la terre [16].

Ces eaux sont souvent loin des sources de pollution. Leurs caractéristiques physico-chimiques varient très peu dans le temps, elles sont comme suit : faible turbidité, contamination bactérienne faible, dureté souvent élevée et une concentration élevée en fer et en manganèse [7].

I.2.1.4. Les eaux de mer et les eaux saumâtres :

La distinction entre les types d'eau repose sur la concentration globale en sel, d'après l'OMS une eau est considérée comme potable si sa salinité totale est comprise entre 100 et 1000 ppm [17].

a. Les eaux saumâtres :

Généralement on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme d'eaux souterraines [18].

b. Les eaux de mer :

b.1. Salinité de l'eau de mer : Ce sont les eaux salées des mers et des océans. Leur salinité vient du fait qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure (Cl^-) et des ions alcalins comme l'ion sodium (Na^+) [8].

Les eaux de mer sont une source d'eau brute qu'on n'utilise que lorsqu'il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce [19].

En réalité il faut considérer que, d'une façon générale, l'eau de mer contient de 35 à 42 g/l de sels minéraux dissous (tableau I.1), la salinité étant différente selon les mers [20].

Tableau I.1 : Classification des eaux selon la salinité [21].

Type d'eau	Eau Douce	Eau légèrement saumâtre	Eau modérément saumâtre	Eau très saumâtre	Eau de mer
Salinité mg/l	< 500	1000 à 5000	5000 à 15000	15000 à 35000	35000 à 42000

Quelques valeurs moyennes de la salinité de l'eau de mer sont données ci-dessous [22]:

- ✓ Mer Baltique: 7 g/l
- ✓ Océan Atlantique: 35 g/l
- ✓ Mer Méditerranée: 38 g/l
- ✓ Mer Rouge: 40 g/l
- ✓ Mer Morte: 270 g/l

b.2. Les compositions de l'eau de mer : L'eau de mer est un liquide dont la composition est extraordinairement variée, puisqu'on y trouve une cinquantaine de corps simples, dont certains, il est vrai, ne sont présents qu'à l'état des traces. L'énumération de ces corps simples va de l'hydrogène, l'oxygène, le chlore et le sodium, dont les pourcentages en poids sont prédominants, au magnésium, calcium, potassium, soufre, brome, fer, phosphore, à l'iode, cuivre, or, nickel, cobalt, radium, uranium, et à beaucoup d'autres corps qui n'existent dans l'eau de mer qu'en infimes quantités. Mais c'est la teneur de l'eau de mer en sels qui nous intéresse ici [20].

b.3. Sources de pollution de l'eau de mer [11] :

- ✓ Vents ;
- ✓ Rivières ;
- ✓ Rejets domestiques ;
- ✓ Navires ;

I.2.2. Les paramètres de l'eau potable :

I.2.2.1. Les paramètres organoleptiques :

a. La couleur :

b. L'odeur et saveur :

Une eau destinée à l'alimentation ne doit présenter ni odeur, ni saveur perceptibles.

La saveur et l'odeur anormales sont causées par la présence dans l'eau des matières organiques dissoutes provenant de la décomposition des matières organiques végétales, de résidus agricoles, de rejets urbains ou industriels et les métabolites de certains microorganismes vivant dans l'eau comme certaines algues ou champignons microscopiques, et aussi certains sels minéraux qui donnent des goûts particuliers à l'eau [14].

Les eaux de consommation doivent posséder un goût non désagréable [23].

c. La turbidité :

Elle est déterminée par la présence de particules minérales et organiques en suspension [24].

I.2.2.2. Les paramètres physico-chimiques :

a. La température :

La température joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz [25].

Pour l'eau potable, la température maximale acceptable est de 15°C. Dans les eaux naturelles et au-dessus de 15°C, il y a risque de croissance accélérée de microorganismes, d'algues, entraînant des goûts et des odeurs désagréables [14].

b. Le potentiel d'Hydrogène (pH) :

Le pH est un paramètre qui permet de mesurer l'acidité, l'alcalinité ou la basicité d'une eau [26]. Il influe sur les phénomènes de corrosion ou d'entartrage des conduites [27].

c. La dureté :

La dureté ou titre hydrotimétrique correspond essentiellement à la présence de sels de calcium et de magnésium [14].

d. La 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 en fonction de la température de l'eau et est plus importante quand celle-ci est élevée [28].

I.2.2.3. Les paramètres indésirables :

Sont dites indésirables certaines substances qui peuvent créer soit un désagrément pour le consommateur : goût et odeur (matières organiques, phénols, fer...), couleur (fer, manganèse...), soit causer des effets gênants pour la santé (nitrates, fluor...) [14].

Pour les substances suivantes, les valeurs de concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs indiquées dans le tableau ci-après [27]:

Tableau I.2 : Les normes des substances indésirables [27].

Substances	Nitrates (NO ₃)	Fer (Fe)	Fluor (F)	Manganèse(Mn)	Cuivre(Cu)
Valeurs	50 mg/l	200 µg/l	1.5m g/l	50 µg/l	2 mg/l

I.2.2.4. Les paramètres toxiques :

Les matières toxiques sont constituées de micropolluants minéraux (métaux lourds : Chrome, Cadmium, Nickel...) ainsi que de substances tels que les cyanures, ou des molécules organiques présentant une action d'inhibition des mécanismes biologiques [14].

Pour les substances suivantes, les valeurs de concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs indiquées dans le tableau ci-après [27]:

Tableau I.3 : Les normes des substances toxiques [27].

Substances	Arsenic	Cadmium	Cyanures	Chrome	Plomb	Nickel
Valeurs (µg/l)	10	5	50	50	10	20

I.2.2.5. Les paramètres microbiologiques :

L'eau potable ne doit contenir aucun microorganisme pathogène et être exempte de toute bactérie indiquant une pollution par excréments [14].

L'eau de consommation ne doit contenir ni des germes pathogènes ni des substances toxiques susceptibles de provoquer de graves contaminations chez le consommateur [29].

I.2.3. Les normes physico-chimiques de l'eau potable :

Les méthodes de traitement des eaux destinées à la consommation humaine viseront donc toutes à soustraire les matières en suspension, ainsi que les matières vivantes et autres substances dissoutes, dans le but de rendre l'eau traitée propre à la consommation en regard des normes légales [30].

I.3. Eaux brutes et les processus de potabilisation :

Les eaux captées dans la nature ne présentent souvent pas les qualités physiques, chimiques et biologiques désirables, propres à la consommation. C'est le rôle du traitement que leur conférer les propriétés souhaitables [3].

Le choix des procédés de traitement d'une eau quelle que soit la nature, dépend directement de plusieurs facteurs qui sont :

- ✓ La connaissance de l'eau à traiter ;
- ✓ L'usage que l'on veut faire ;
- ✓ Le degré du développement de pays considéré et le progrès de la technologie [2];

Afin de produire une eau de consommation, qui répond aux normes de potabilité, à partir d'une eau brute, il faut que cette eau passe par une série de traitements. Les types et nombres de procédés de traitement diffèrent selon la nature et l'origine des eaux traitées [8].

- ✓ Le prétraitement ;
- ✓ Le traitement de clarification ;
- ✓ Le traitement de finition [31];

I.3.1. Le prétraitement des eaux de consommation :

Les eaux brutes doivent subir, avant leur traitement proprement dit, un prétraitement. Les prétraitements physiques constituent une série d'opérations susceptibles d'alléger les eaux brutes des matières les plus grossières d'une part ou celles pouvant gêner le processus du traitement ultérieur [32].

I.3.2. Traitement physico-chimique :

La clarification est l'ensemble des opérations permettant d'éliminer les matières en suspension d'une eau brute ainsi que la majeure partie des matières organiques [33].

Cette étape peut comprendre divers sous-processus de traitement, tels que pré-oxydation, décantation lamellaire ou un système coagulation-floculation-décantation, ainsi que la filtration proprement dite (sur sable ou par membranes) [30].

I.3.3. Traitement de finition :

La qualité des eaux est telle qu'elle exige la plupart du temps un traitement plus ou moins complexe afin de rendre l'eau propre à l'alimentation. Dans toute cette étude, il s'agit de la désinfection, c'est-à-dire l'élimination des agents pathogènes des eaux destinée à la consommation humaine [34].

I.3.4. Amélioration des eaux potables :

Pour un perfectionnement de la qualité de l'eau traitée, on procède à l'affinage, ou correction chimique visant à 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.

Dans cet esprit, nous examinerons successivement dans cette section la neutralisation de l'eau, son adoucissement, la suppression des sels de fer et de manganèse, et enfin d'adsorption de polluants organique, 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 utilisés après filtration sur sable [3].

I.3.4.1. La déminéralisation :

Les eaux très chargées en sels minéraux dissous peuvent présenter des inconvénients dans certains usages. Ainsi, souvent on est appelé à éliminer totalement ou partiellement certains ions tels que : Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Ces techniques ne sont utilisées en général que si les ressources conventionnelles sont insuffisantes. Pour l'élimination de ces sels minéraux on utilise:

- ✓ La distillation ;
- ✓ Les procédés membranaires [35] ;

I.4. La mer à boire :

Si depuis plus d'un demi-siècle, le pétrole occupe une place prépondérante dans les rapports de force qui rythment l'économie et la politique mondiale, la problématique de la ressource en eau potable apparaît sur le devant de la scène depuis seulement quelques années.

L'eau représente notre ressource naturelle la plus précieuse. L'eau potable est en effet un bien indispensable à la survie, pourtant sa disponibilité n'est pas assurée partout et la situation ne s'améliore pas dans la mesure où la population augmente en même temps que la pollution et le réchauffement climatique. Les données les plus récentes font état de pénurie d'eau douce pour près de 40 % de la population mondiale [36].

La pénurie d'eau s'aggravera dans les années à venir et cette situation empirera si aucun remède n'y est apporté.

La crise de l'eau potable est annoncée pour les années 2000-2020. Le dessalement des eaux saumâtres et, à fortiori, de l'eau de mer procure une solution séduisante à cette problématique. C'est pourquoi le marché du dessalement est d'ores et déjà en pleine expansion avec une progression d'environ 7 % par an [37].

I.5. Eau de mer pour eau potable :**I.5.1. Différents procédés de dessalement :**

Le dessalement d'eau est un procédé physique qui permet de ramener le taux de salinité d'eau brute, à des valeurs conformes aux normes de potabilité d'eau.

La distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent [38].

I.5.1.1. La distillation :

Ce procédé est la première technique historiquement utilisée dans le dessalement de l'eau de mer du fait, probablement, de sa simplicité. Cette méthode consiste à faire évaporer l'eau salée. Par ce processus, les sels ainsi que les autres composés dissous se déposent tandis que de la vapeur d'eau s'élève. Cette dernière est ensuite recondensée afin de recueillir l'eau douce [39].

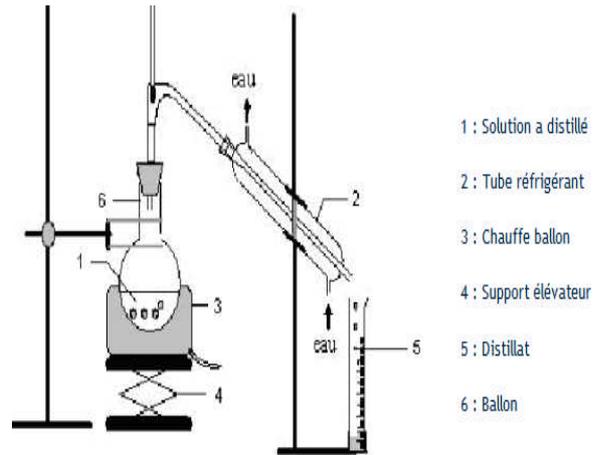


Figure I.1 : Montage de distillation [40].

I.5.1.2. L'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10^{-7} mm de taille [41].

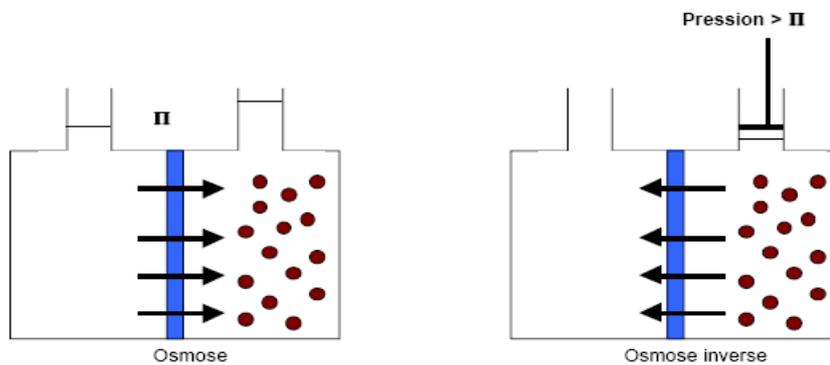


Figure I.2 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse [41].

a. Pression osmotique :

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée π peut être calculée d'après la loi de Van't Hoff suivante:

$$\pi = i \times C \times R \times T \tag{I.1}$$

Où i : est le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte.

C : est la concentration en sels en (mol. m^{-3}) .

R : est la constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J. mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

T : est la température absolue de la solution ($^{\circ} \text{K}$) [41].

I.5.2. Les installations de dessalement de l'eau de mer :

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes (figure I.3):

- ✓ Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière ;
- ✓ Un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte ;
- ✓ Le procédé de dessalement lui-même ;
- ✓ Le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite [42].

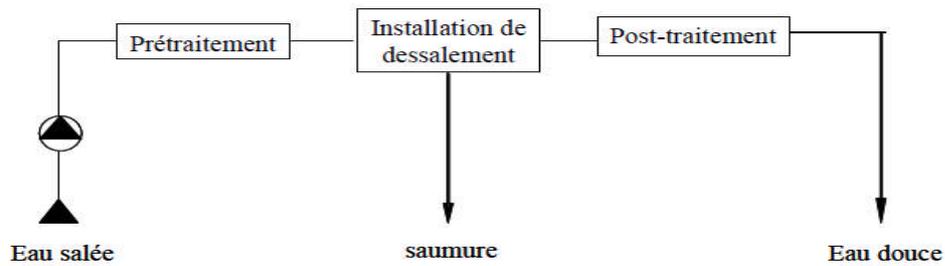


Figure I.3: Schéma général d'une installation de dessalement [43].

I.5.2.1. La prise d'eau :

La prise d'eau de mer est la première étape de la filière de dessalement. Elle doit permettre d'obtenir une eau en entrée de filière de la meilleure qualité possible et surtout minimiser les matières en suspension présentes [44].

I.5.2.2. Procédés de prétraitement:

Le prétraitement de l'eau de mer avant osmose inverse est absolument nécessaire car les membranes d'osmose inverse sont très sensibles au colmatage et une bonne qualité de l'eau en entrée des modules d'osmose inverse est indispensable pour assurer des performances stables de l'osmose inverse sur le long terme.

Le prétraitement a pour objectif l'augmentation de la durée de vie des membranes, l'amélioration de la qualité de l'eau produite, la maintenance des performances de l'osmose inverse et la réduction du colmatage (tableau I.4) [5].

Tableau I.4 : Les différents colmatages possibles [15].

Colmatage	Cause	Prétraitement approprié
Biologique	Bactéries, microorganismes, virus, protozoaires	Chloration
Colloïdal	Complexes organique et inorganiques, particules colloïdales, micro-algues	Coagulation + filtration Optionnel : floculation/décantation
Organique	Matière organique(MO) : acides humiques et flaviques, bio polymères	Coagulation +filtration adsorption sur charbon actif Coagulation + ultrafiltration

Minéral	Calcium, magnésium, Baryum ou strontium, sulfates et carbonates	Anticalcaire acidification
Oxydant	Chlore, ozone, $KMnO_4$	Meta-bisulfite de soude charbon actif en granulés

Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques.

Les prétraitements physiques incluent les pré-filtres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire [5].

Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants et de désinfectants [45].

✓ Une acidification (acide sulfurique) pour éviter les précipitations du calcium lié aux bicarbonates, et/ou une injection d'un séquestrant pour éviter celles du calcium lié principalement aux sulfates ;

✓ Une injection de chlore pour l'oxydation des micro-organismes, suivie d'une déchloration (injection de bisulfite de sodium) afin de ne pas oxyder les membranes [46];

A l'heure actuelle, la plupart des usines d'osmose inverse utilise un procédé de prétraitement conventionnel qui généralement consiste en un prétraitement physique et chimique sans procédé membranaire.

Avec la baisse constante du prix des éléments membranaires et la dégradation de la qualité des ressources en eau, le prétraitement par procédé membranaire trouve de plus en plus sa place dans les étapes de prétraitement avant osmose inverse.

Nous allons détailler à présent les deux types de filières de prétraitement : conventionnelle et à membrane [47]. .

a. Le prétraitement conventionnel : Est encore très majoritairement utilisé dans les usines de dessalement. La filière de prétraitement conventionnel dans une usine de dessalement de l'eau de mer comporte généralement les étapes suivantes (figure I.4).

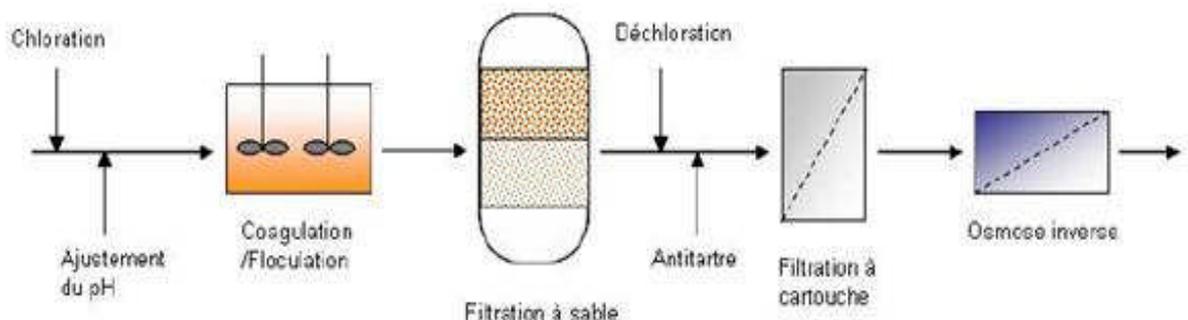


Figure I.4: Prétraitements conventionnels à l'osmose inverse [5].

a.1. Procédés typiques de prétraitement du dessalement d'eau de mer:

a.1.1. Pré-filtration grossière : Elle sert à éliminer les gros matériaux qui peuvent endommager les installations et diminuer l'efficacité globale du procédé de traitement [5].

a.1.2. La chloration : Cette étape est nécessaire car elle va permettre de désinfecter et d'éviter la croissance biologique qui cause le colmatage de la membrane.

Une concentration en chlore résiduel libre comprise entre 0.5 à 1mg/l doit être maintenue constante le long de la filière de prétraitement pour empêcher le colmatage de la membrane.

a.1.3. Ajustement du pH : On ajoute de l'acide sulfurique (H_2SO_4) pour empêcher l'entartrage par $CaCO_3$ [5].

a.1.4. Coagulation et floculation : Sera développée dans le chapitre III.

a.1.5. Filtration sur sable mono ou multicouche : La filtration sur sable est utile pour éliminer les agglomérats produits lors de l'étape précédente de coagulation [5].

a.1.6. Dé-chloration et antitartre : La dé-chloration doit être effectuée avant l'étape d'osmose inverse car le chlore résiduel peut détériorer les membranes d'OI. On utilise en principe le méta-bisulfite de sodium ($Na_2S_2O_5$) pour éliminer le chlore pour son efficacité et son faible coût. Il réagit avec l'eau pour donner du bisulfite de sodium. Une autre solution est l'utilisation de charbon actif granulé [48].

Le dosage d'anti-incrustant pour éviter la précipitation de sels incrustants à savoir le calcium, le magnésium, le strontium et le baryum, qui produisent une rapide obstruction des membranes et par conséquent une diminution du débit d'eau traitée [49].

a.1.7. Une filtration fine : Est requise juste avant le passage au travers des membranes d'osmose inverse [15].

Filtration à cartouche : C'est l'ultime étape du prétraitement conventionnel. Il va rester des particules d'un diamètre supérieur à 5 μm qui présentent le risque d'endommager le module d'osmose inverse.

Dans tous les cas, une installation d'O.I doit être protégée par une filtration de sécurité sur cartouches aux environs de 5 μm [5].

b. Prétraitement par membranes : A cause des limitations du prétraitement conventionnel, un intérêt croissant a été porté sur l'utilisation des procédés membranaires [48].

Les systèmes membranaires ont été utilisés pour le traitement de l'eau, en particulier pour le dessalement depuis plusieurs dizaines d'années. Récemment, ces systèmes ont été

employés pour des applications plus diverses telles que l'élimination de la turbidité ou l'élimination des matières organiques afin de répondre à différents objectifs de traitement.

Ainsi, des unités de microfiltration, d'ultrafiltration et de nano filtration ont été implantées en remplacement d'installations conventionnelles existantes.

Ces systèmes présentent l'avantage d'utiliser peu de produits chimiques et engendrent des coûts d'exploitation relativement faibles [50], le rendement de l'osmose inverse sera significativement plus élevé que lors du traitement conventionnel, la durée de vie des membranes d'OI sera prolongée, le procédé ne souffrira pas des variations de qualité de l'eau d'alimentation, les phases de désinfection et de nettoyage de l'OI seront moins nécessaires [48].

Une nouvelle application pour l'ultrafiltration : le prétraitement efficace à l'osmose inverse pour diverses applications. La popularité de l'ultrafiltration comme prétraitement au dessalement de l'eau de mer et au traitement des eaux usées va croissante.

Dans les applications de dessalement d'eau de mer, l'UF est de plus en plus populaire. Cela est dû aux progrès de la technologie membranaire UF et l'ampleur des économies résultant d'une demande croissante. De récentes comparaisons de coûts ont montré que, lorsque tous les éléments financiers et les impacts sur les étapes de traitement en aval sont pris en compte, l'UF rivalise avec les technologies traditionnelles de prétraitement.

Le choix de la technique de prétraitement la plus adaptée pour ces applications dépend de la qualité de l'eau de mer à traiter, directement liée à la localisation de la prise d'eau, notamment de la quantité et de la nature des matières organiques, algues et particules. L'UF présente une meilleure efficacité de rétention des matières organiques en suspension contenues dans l'eau de mer, des particules de petite taille, des limons et des pathogènes. De surcroît, l'UF offre cette excellente qualité de filtrat en permanence, indépendamment des fluctuations de la qualité de l'eau d'alimentation, par exemple dues aux variations saisonnières [51]. La filtration sur membrane se trouve ainsi en position de « challenger » avec un développement rapide, face à la technologie conventionnelle et parfois aussi en combinaison de celle-ci (figure I.5).

Il faut noter également que, parmi les technologies membranaires disponibles, l'ultrafiltration offre des avantages conséquents par rapport à la microfiltration (MF) : les membranes d'UF, travaillant à flux identique à celui de la MF, montrent en effet une meilleure rétention des virus et des matières organiques, ces dernières étant d'ailleurs souvent responsables du colmatage des membranes de nano filtration ou d'osmose inverse fonctionnant en aval [51].

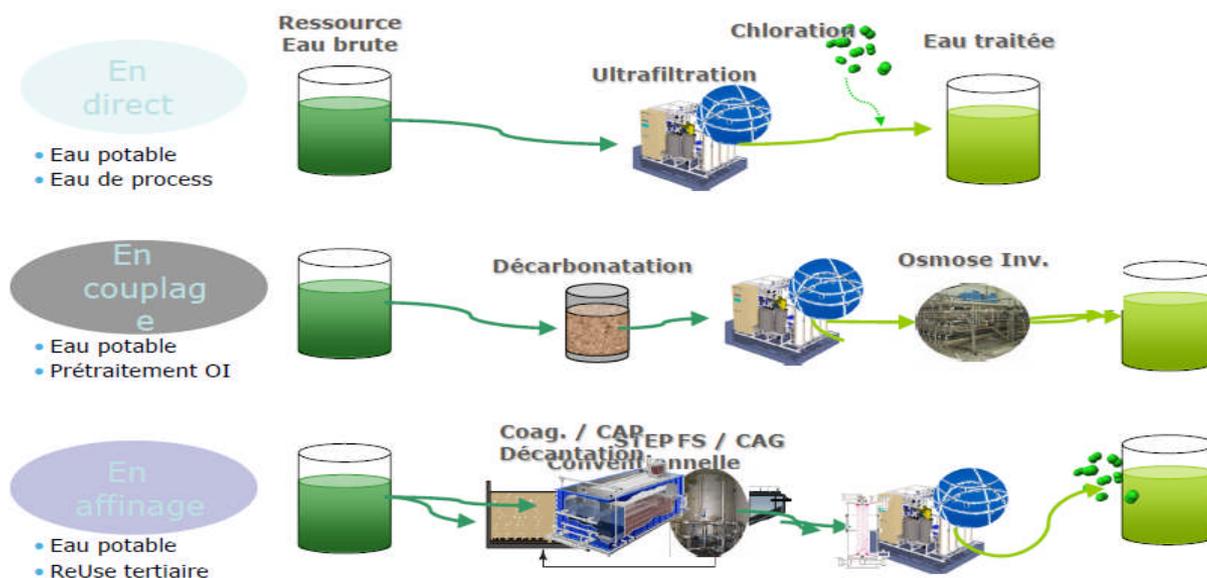


Figure I.5 : Position de l'ultrafiltration dans la filière de traitement [51].

I.5.2.3. Installation de dessalement :

Le choix de la meilleure technologie de dessalement peut dépendre de la géographie, de l'environnement, de l'eau brute et de la qualité de l'eau produite, de la disponibilité des technologies, de l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation disponible, des coûts, ... etc [52].

I.5.2.4. Le post-traitement :

Permet de potabiliser l'eau en 2^{ème} étape (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est pas potable car elle est déminéralisée) [53]. Il convient de reminéraliser le perméat. De plus, les membranes d'OI étant perméables aux gaz, l'eau du perméat est souvent plus acide que l'eau d'alimentation en raison du dioxyde de carbone dissous (CO_2 issu de la dissociation des bicarbonates), ce qui oblige à corriger son pH [3]. L'eau doit enfin subir une désinfection par injection de chlore, dont le résiduel permettra de la protéger lors de son transport et de son stockage [53].

I.6. Quelques stations utilisant la coagulation-floculation et la filtration membranaire comme prétraitement de l'eau de mer :

Dans un autre ordre d'idée, la coagulation-floculation, filtration (filtration sur sable) et la filtration membranaire (MF, UF, NF) sont aussi utilisées comme prétraitement pour le procédé de dessalement par osmose inverse afin d'augmenter la qualité de l'eau à traiter et d'éviter le colmatage des membranes d'osmose [54].

Cette partie sera consacrée à quelques exemples de station utilisant les différents procédés dans le prétraitement de l'eau de mer.

I.6.1. Station de dessalement de Souk Tleta:

L'objectif de ce projet était la construction d'un réseau de transport d'eau entre la station de dessalement de Souk Tleta et le réseau de distribution de la région de Tlemcen .

Grâce à lui, il a été possible d'approvisionner en eau, 24 heures sur 24, une population aujourd'hui estimée à 1 million de personnes. Il devrait en outre permettre de couvrir les besoins en eau potable des habitants de la région jusqu'en 2050.



Figure I.6: Station de dessalement de Souk Tleta.

I.6.1.1. Description de la station :

La station de dessalement de Souk Tleta située à une cinquantaine de kilomètres de Tlemcen, mise en service au mois de décembre (2009). Cette station a une capacité de production de 200.000 m³/j. Elle est constituée de quatre étapes : la pré-filtration (filtre rotatif), l'ultrafiltration, l'osmose inverse et le poste traitement.



Figure I.7: Système d'ultrafiltration.



Figure I. 8: Système d'osmose inverse.

Photograph: Hyflux

I.6.2. Station de dessalement de Ténès :

I.6.2.1. Présentation de l'unité de dessalement de l'eau de mer :

L'unité de dessalement de l'eau de mer à Ténès se situe dans la zone d'expansion touristique de Mainis, à la sortie de la ville côtière environ 6 km à l'Ouest de la ville de Ténès et à 60 km de la ville de Chlef, elle s'étend sur une superficie de 6100 m² (figure I.9) [49].



Figure I.9: Vue générale de la station de dessalement de Ténès [49].

I.6.2.2. Présentation de l'unité :

L'unité de dessalement de la ville de Ténès est créée pour éliminer la déficience en matière d'alimentation en eau potable des quartiers de la commune côtière « Mainis » qui reçoit de nombreux estivants en été. Le jeudi 19 juillet 2007, la station a été mise en service.

L'unité de dessalement de Ténès a pour but de produire l'eau douce pour la consommation humaine. Cette dernière comprend une station de pompage des eaux brutes, un décanteur lamellaire, une station de dessalement, un poste de transformation, un groupe électrogène de secours, un local de stockage, un magasin, un logement de service et un laboratoire. Les capacités de l'unité sont de l'ordre de 5000 m³/j [49].

I.6.2.3. Captage et pompage de l'eau brute :

Dans cette station, la prise d'eau faite en pleine mer à 600 m se fait par un tuyau d'aspiration qui se termine par une crépine adaptée d'un diamètre de 500 mm. Le captage est effectué en zone profonde d'environ 8 m, éloigné de la côte, protégé des pollutions et des forts courants et il n'est pas influencé par les rejets. (figure I.10) [49].



Figure I.10: Tuyau de captage [49].

I.6.2.4. Prétraitement de l'eau brute : Les principaux modes du prétraitement sont :

a. La coagulation:

La coagulation est l'élimination des substances indésirables présentes dans les eaux naturelles, qui possèdent une très petite taille (particules colloïdales causant la turbidité) et celles qui sont dissoutes (matières organiques causant la coloration de l'eau) par l'introduction des réactifs chimiques appelés coagulants. Donc, le but de la coagulation c'est la neutralisation des charges primaires qui permet d'annuler les forces de répulsion suivie par le piégeage dans les précipités [49].

b. La floculation :

La floculation consiste à agglomérer sous forme de floes les particules colloïdales neutralisées au paravent par coagulation. La coagulation et la floculation sont appliquées dans le cas où l'eau de mer a une turbidité élevée [49].

c. La décantation :

Après l'étape de coagulation floculation, si la densité de ces floes est supérieure à celle de l'eau, il y'a décantation.

Dans la station de dessalement de Ténès, le type de décanteur utilisé est lamellaire (figure I.11). Ce décanteur est divisé en trois compartiments : le 1^{er} compartiment contient de l'eau brute, le 2^{ème} compartiment est caractérisé par des lamelles tubes ou modules hexagonaux selon un angle de 60° par rapport à l'horizon, chaque tube est considéré comme un décanteur unitaire et un 3^{ème} compartiment qui contient de l'eau après décantation lamellaire [49].

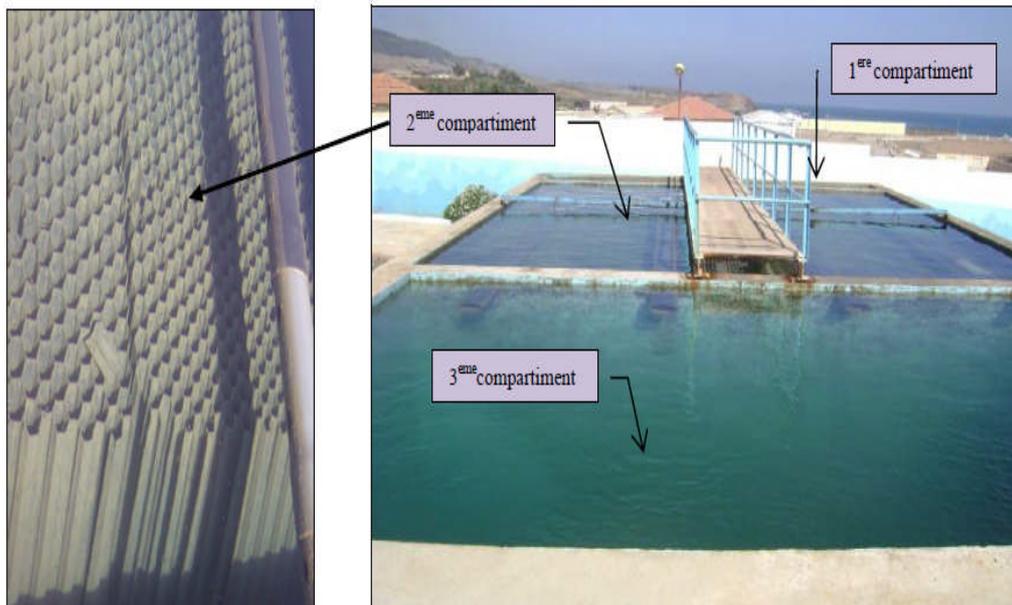


Figure I.11: Décanteur lamellaire [49].

d. La filtration de dégrossissage :

La filtration est la barrière ultime et obligatoire de la filière de traitement des eaux dans la majeure partie des cas. La filtration a pour but d'obtenir une clarification poussée de l'eau par l'élimination des dernières particules en suspension, des coliformes qui n'auront pu être retenues par le décanteur avec un choix de la granulométrie du milieu filtrant qui jouera un rôle fondamental sur l'efficacité de ce procédé.

Le système de filtration proposé par la station de dessalement de Mainis (Ténès) s'effectuera grâce à un montage en parallèle en une ligne de quatre filtres à base de matériaux inertes qui sont l'antracite et le silex [49].

e. Le conditionnement chimique :

Après filtration à sable, des équipements de dosage font partie du prétraitement chimique appliqué à l'eau de mer avant l'entrée dans les membranes.

- e.1. L'acidification de l'eau brute ;
- e.2. Le dosage de réducteur de chlore (bisulfite de sodium) ou bien dé-chloration ;
- e.3. Le dosage d'anti-incrustant [49];

I.6.2.5. Equipement osmose inverse :**a. La filtration de sécurité ou microfiltration :**

L'eau alimente les micros filtres qui ont pour objectif de retenir les particules qui peuvent être entraînées par l'eau filtrée ou par les produits de conditionnement, pour protéger les pompes de haute pression et les membranes d'osmose inverse. La microfiltration est assurée par l'utilisation d'un filtre à cartouche (figure I.12) [49].

b. Pompe haute pression et turbine de récupération :

D'après la figure (I.12) l'eau pré-filtrée arrive au système de pompage de haute pression puis il est envoyé vers les membranes d'osmose inverse [49].

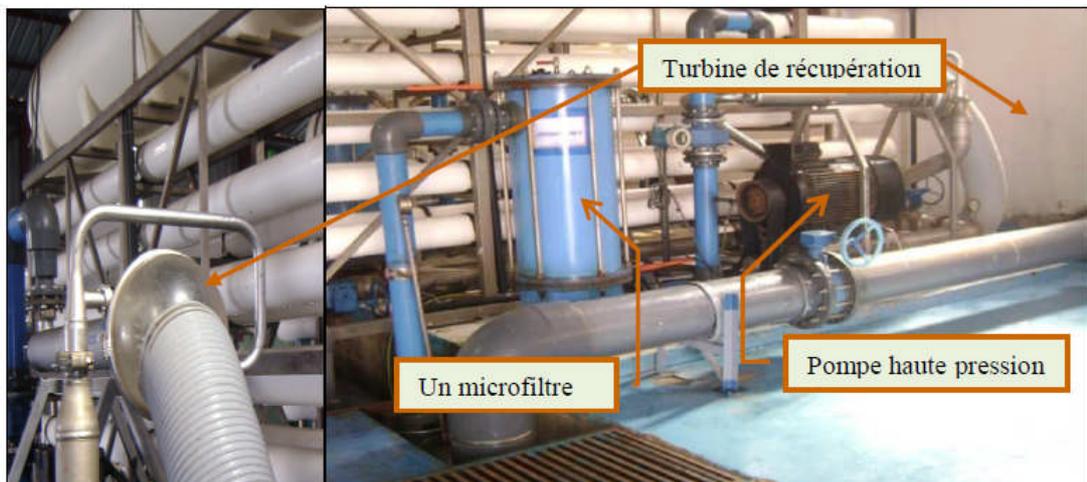


Figure I.12: Filtration de sécurité, pompe haute pression et turbine de récupération [49].

c. Système de membranes d'osmose inverse :

L'installation des membranes se compose de six lignes indépendantes produisant chacune 833 m³/ jours. Les membranes seront installées dans 11 tubes de pression pour 7 unités. Les tubes de pression sont disposés pour travailler à une récupération totale de 45% d'eau osmosée et 55% d'eau concentrée (figure I.11) [49].



Figure I.13: Le système de membrane d'osmose inverse [49].

I.6.2.6. Poste traitement :

L'étape de poste de traitement comporte deux phases principales : Ajustement du pH et poste de chloration.

Bien que les membranes d'osmose inverse retiennent tous les micro-organismes (bactéries, virus) ; il est nécessaire d'assurer un résiduel de désinfection pour éviter toute contamination et développement biologique. Dans ce contexte, il existe de nombreuses méthodes de désinfection de l'eau, mais la plus utilisée est la chloration par l'utilisation d'une solution d'hypochlorite de sodium. Ainsi, la chloration permet de détruire les organismes pathogènes présents dans l'eau et protéger l'eau contre de nouvelles contaminations ultérieures au cours de son transport ou son stockage [49].

I.7. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons décrit donc successivement les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux.

La majeure partie de la clarification de l'eau se fait au niveau de l'étape coagulation-floculation, ce qui constitue un traitement fondamental pour une eau turbide. De plus, le développement des techniques de l'ultrafiltration des eaux a permis la réduction de la taille des équipements. Ces systèmes ont été employés pour des applications plus diverses telle que l'élimination de la turbidité afin de répondre à différents objectifs de traitement.

Chapitre II

*Une nouvelle application pour
l'ultrafiltration: Prétraitement
au dessalement de l'eau de mer*

CHAPITRE II

Une nouvelle application pour l'ultrafiltration: prétraitement au dessalement de l'eau de mer

II.1. Introduction :

Les méthodes de filtration sont utilisées pour séparer les constituants d'une solution en opérant une ségrégation par la taille.

Les procédés à membranes constituent un groupe de techniques en pleine évolution. Depuis plusieurs années, ces techniques sont utilisées comme méthodes de purification dans les laboratoires biologiques et pharmaceutiques et sont depuis peu appliquées industriellement dans le domaine de la récupération d'ions métalliques [55].

La filtration membranaire est de plus en plus utilisée comme procédé de séparation dans de nombreux domaines notamment dans le cycle de l'eau (potabilisation de l'eau, traitement des effluents, réutilisation de l'eau, adoucissement, dessalement ...). La filtration membranaire est basée sur l'application d'une différence de pression qui permet le transfert du solvant à travers une membrane dont la taille des pores assure la rétention de solutés [56].

II.2. Les techniques membranaires :

Actuellement, il y a quatre principaux procédés membranaires qui sont utilisés pour produire de l'eau potable : MF, UF, NF et OI. Ces procédés sont tous des procédés où la force motrice de transport à travers la membrane est un gradient de pression. Comme cela est expliqué ci-dessous, les membranes de MF, de UF, de NF et d'OI diffèrent par leur structure poreuse et donc par la taille des particules et des molécules qui peuvent être retenues.

a. La microfiltration pour laquelle la taille des pores est de l'ordre du micromètre se situant généralement entre 0,1 à 10 μm ;

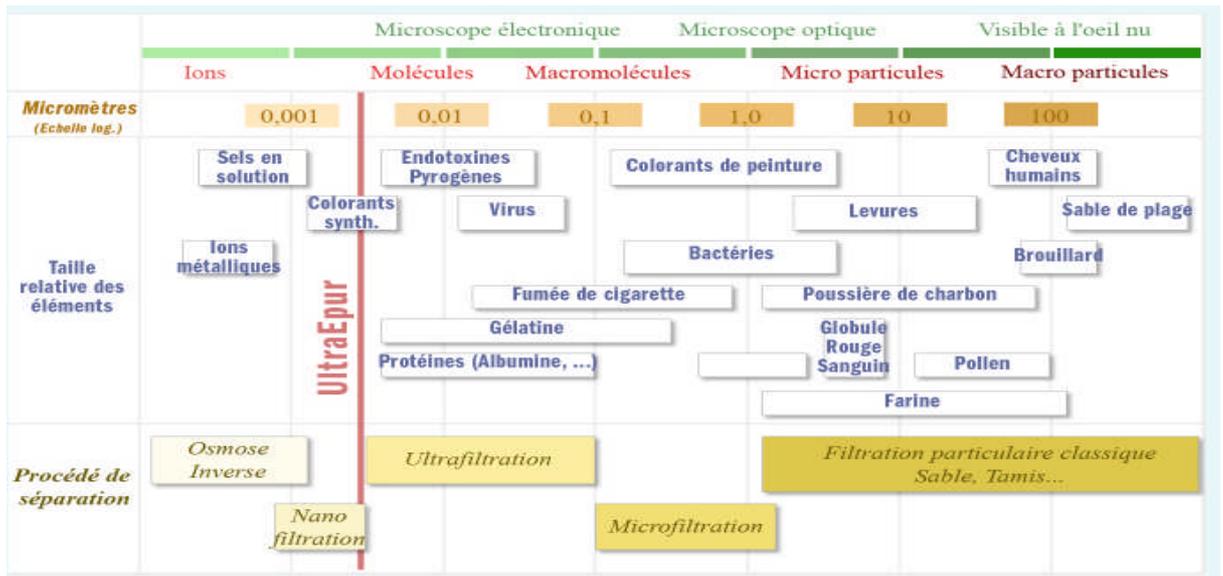
b. L'ultrafiltration se situe entre la microfiltration et la nano filtration, avec une taille de pores variant de 1 à 100 nm (0,001 à 0,1 μm);

c. La nano filtration où la taille de pores est de l'ordre du nanomètre (0,001 μm) [57].

d. L'osmose inverse est un procédé de purification de l'eau. Cette technique permet de dessaler l'eau de mer [27];

Le tableau ci-dessous présente les différents degrés de filtration possibles avec cette technologie, ainsi que l'efficacité de l'ultrafiltration.

Tableau II.1: Types de filtration [58].



II.2.1. Microfiltration (MF) :

La MF est le plus ancien de tous les procédés membranaires, étant utilisé et commercialisé pour la première fois par Sartorius Werke GmbH en Allemagne en 1929.

Les membranes de MF utilisées dans le domaine de l'eau potable sont capables de retenir des particules plus grandes que 0,1µm. Ces membranes permettent donc de retenir en bonne partie les particules à l'origine de la turbidité [59]. Ces membranes permettent aussi de retenir les bactéries, les protozoaires et les colloïdes grossiers (figure II.1) [60].

L'utilisation principale de la MF reste la clarification c'est-à-dire l'enlèvement des particules en suspension. La MF peut aussi servir de prétraitement pour la NF et l'OI [59].

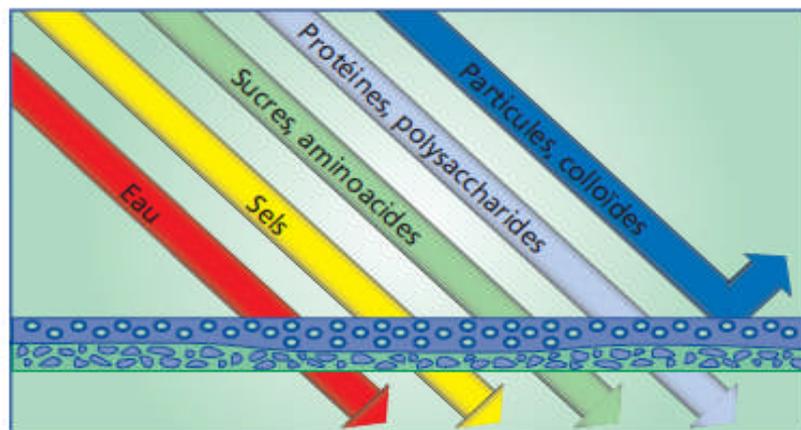


Figure II.1: Microfiltration [61].

II.2.2. L'ultrafiltration pour la production d'eau potable :

L'ultrafiltration est un procédé membranaire, qui laisse passer les petites molécules (eau, sels) et arrête les polymères, les protéines et les colloïdes (figure II.2) [43].

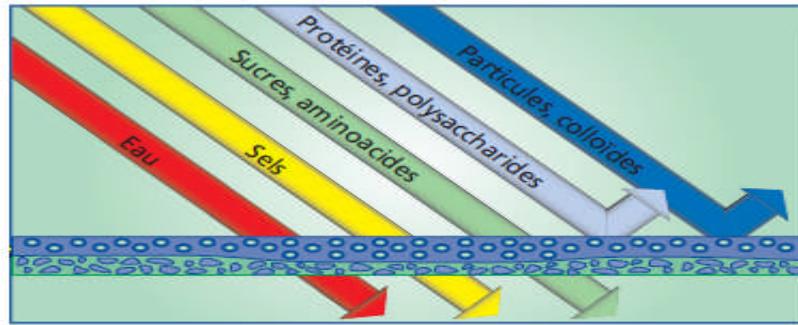


Figure II.2: Ultrafiltration [61].

II.2.3. Nano filtration :

Elle est souvent utilisée pour l'adoucissement des eaux (enlèvement des ions multivalents, en l'occurrence le calcium et le magnésium responsables de la dureté) [27].

La nano filtration permet de retenir tous les polluants dissous, qu'ils soient biologiques, organiques ou minéraux. Elle permet, aussi, de diminuer notablement l'usage du chlore. Son seul inconvénient technique est que l'eau produite est tellement pure qu'il est nécessaire de la reminéraliser (figure II.3) [62].

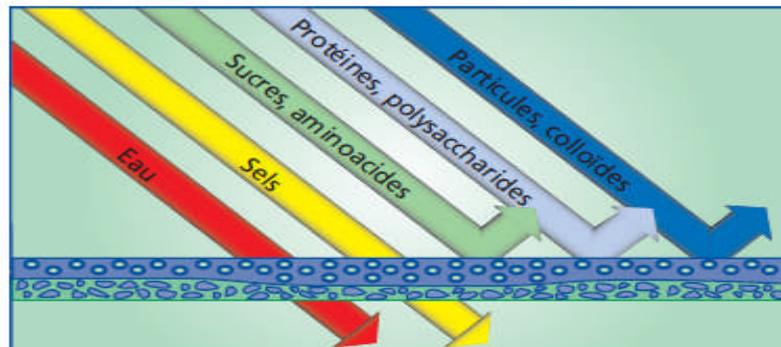


Figure II.3: Nano filtration [61].

II.2.4. L'osmose inverse :

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau et arrêtent tous les sels (figure II.4). Cette technique est utilisée pour le dessalement des eaux de mer, des eaux saumâtres et pour la production d'eau ultra pure [43];

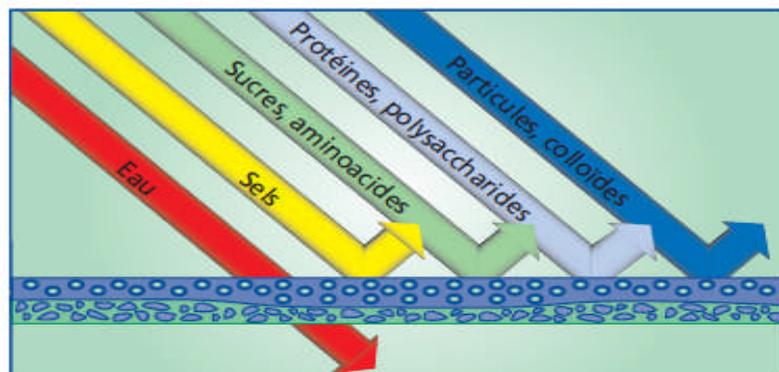


Figure II.4: Osmose in2

verse [61].

II.3. L'ultrafiltration :

L'ultrafiltration est devenue une technique très en vogue ces dernières années du fait de la mise au point de membranes performantes et résistantes du point de vue chimique, thermique et mécanique [55].

II.3.1. Historique :

Le principe de la filtration membranaire a été développé dans les années 70 pour le traitement de liquides, notamment dans l'industrie laitière. Il a ensuite été utilisé pour la production d'eau potable à grande échelle.

Propre, performante et économique, l'ultrafiltration membranaire remplace souvent des techniques de traitement plus conventionnelles, du fait de sa capacité à éliminer les agents pathogènes et de sa compacité (elle peut remplacer avantageusement un système de coagulation, floculation avec filtre à sable). De plus, elle permet de valoriser les concentrats dans l'industrie (récupération de colorants ...) [55].

II.3.2. Généralités :

L'ultrafiltration est une alternative à la filtration conventionnelle pour la clarification des eaux, avec une amélioration sensible de l'efficacité de traitement (abattement de la turbidité à 0,1 NTU) qui est obtenue quelle que soit la qualité de l'eau brute traitée et sans ajout de produit chimique.

L'ultrafiltration remplace aussi la microfiltration du fait de sa capacité à éliminer non seulement les petites particules mais aussi les pathogènes en incluant les micro-organismes, les virus, les pyrogènes et quelques espèces organiques dissoutes [63].

II.3.2.1. L'ultrafiltration pour tous types d'eau : L'ultrafiltration permet de traiter :

- ✓ Eaux douces : eau de source, souterraine, eau de barrage, de lac naturel, eau de rivière;
- ✓ Eau salée : eau saumâtre, eau de mer ;
- ✓ Eaux usées : domestiques, industrielles, urbaines / brutes ou prétraitées (filtration tertiaire) ;
- ✓ Les effluents concentrés : produits laitiers, effluents textiles [63];

II.3.3. Objectifs de l'ultrafiltration : L'ultrafiltration permet d'atteindre trois objectifs:

II.3.3. 1. L'ultrafiltration pour clarifier :

L'ultrafiltration assure l'élimination des matières en suspension ; particules minérales, particules vivantes, turbidité, les colloïdes [63].

II.3.3. 2. L'ultrafiltration pour désinfecter :

La Microfiltration élimine tous les micro-organismes (bactéries, algues ...) et les gros pathogènes comme les Cryptosporidium et Giardia. L'ultrafiltration élimine en plus les virus. La clarification et la désinfection sont assurées souvent en une seule étape [63].

II.3.3. 3. L'ultrafiltration pour concentrer :

L'ultrafiltration peut aussi être utilisée pour concentrer des matières en suspension et/ou des microorganismes pour réduire le coût de l'étape de déshydratation [63].

Tableau II.2 : Objectif du techniques séparatives à membranes [63].

Objectif	procédé	Types de filtration
Clarification, désinfection primaire ;	Basse pression	Microfiltration
Clarification, désinfection virale, prétraitement pour NF et OI ;	Basse pression	Ultrafiltration
Rétention des molécules organiques et des gros ions, décoloration, dessalement partiel, adoucissement ;	Haute pression	Nano filtration
Dessalement-déminéralisation ;	Haute pression	Osmose inverse

II.3.4. Principe :

L'ultrafiltration est un traitement purement physique qui ne génère aucun sous-produit et peut traiter n'importe quelle qualité d'eau avec la même action désinfectante.

L'ultrafiltration est un procédé basse pression, où la force motrice est la pression du liquide à traiter. Pré-filtré, le liquide brut est envoyé vers un module d'ultrafiltration constitué de membranes semi-perméables. Toutes les particules (parasites, bactéries, virus, germes, matières en suspension, macromolécules) de taille supérieure au seuil de coupure sont retenues à la surface des membranes (figure II.5), et régulièrement éliminées par rétro-lavage.

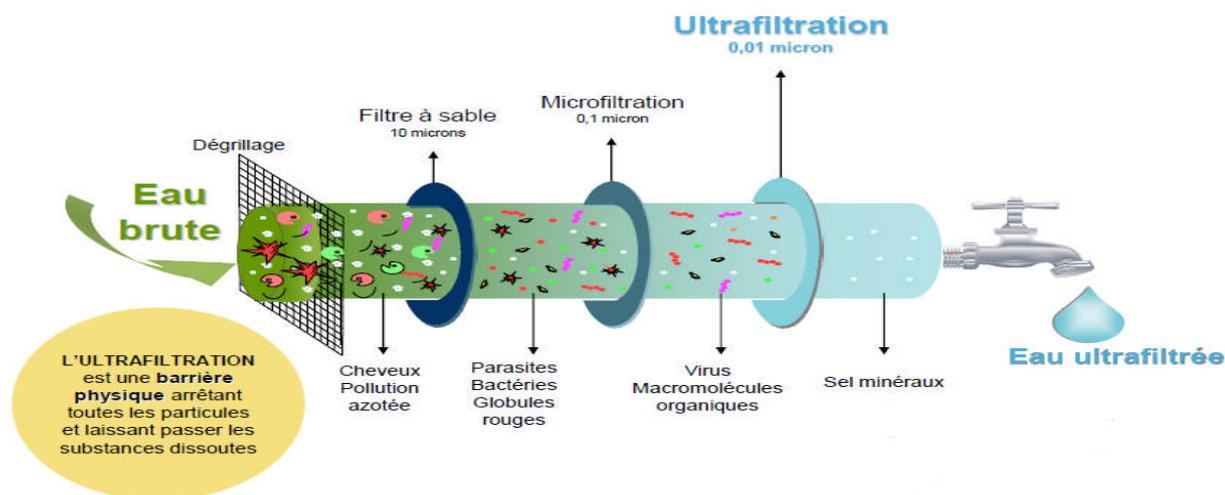


Figure II.5: Les particules retenues à la surface des membranes UF [65].

II.3.5. Comparaison entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration :

Le principe de l'ultrafiltration ne diffère pas fondamentalement des autres technologies comme l'osmose inverse. La différence la plus importante est la taille des particules qui sont retenues par la membrane, et les conditions de travail. L'osmose inverse concerne les constituants les plus petits tels que des ions (figure II.6) [66].

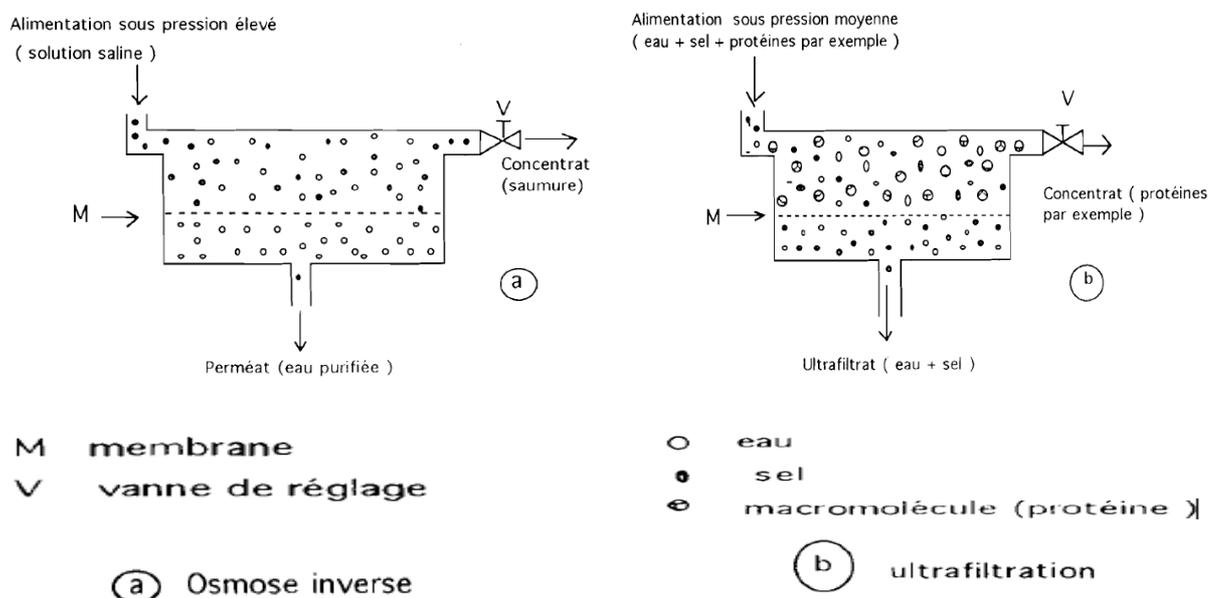


Figure II.6: Comparaison entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration [55].

II.3.6. Le bon fonctionnement d'une installation UF :

Une installation d'ultrafiltration met en œuvre un ensemble de membranes organisées en modules ; celles-ci sont assemblées en étages; l'ensemble de ces étages constitue l'architecture de l'installation (figure II.7) [67].

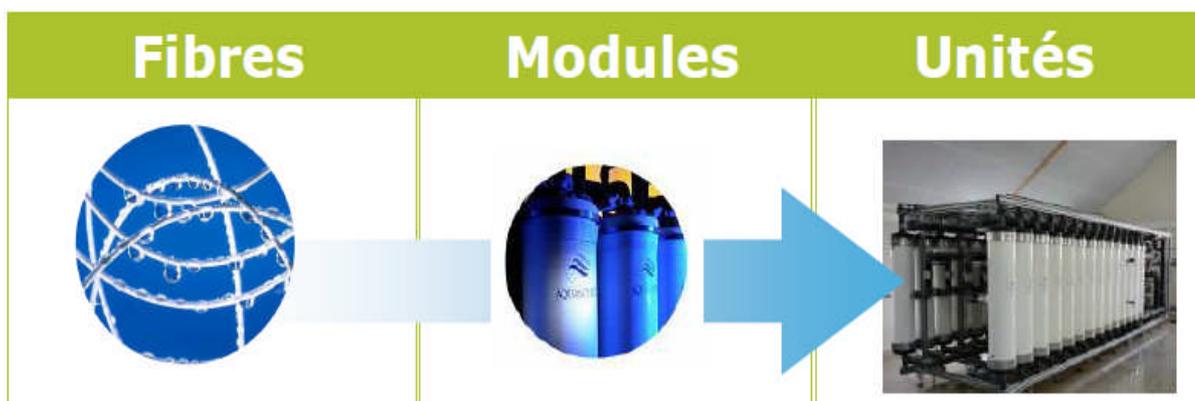


Figure II.7: Une installation d'ultrafiltration [67].

Le bon fonctionnement d'une installation UF est en relation avec les caractéristiques du fluide à traiter (température, concentration), du débit et des techniques de nettoyage. Ce dernier point est évidemment important, en effet le colmatage tend à réduire le flux de filtrat quelle que soit la constitution de la membrane et son utilisation [68].

II.3.7. Les applications de l'ultrafiltration :

De nombreuses industries utilisent cette technologie comme :

- ✓ L'industrie laitière (lait, fromage) ;
- ✓ L'industrie du textile (récupération de peinture, teinture) ;
- ✓ L'industrie alimentaire (protéines) [15];

Exemples d'application :

- ✓ Production d'eau potable ;
- ✓ Pré traitement avant déminéralisation ou dessalement ;
- ✓ Traitement des eaux de piscines, des eaux de lavage [63] ;
- ✓ Désinfection des eaux ;
- ✓ Traitement des eaux d'hôpitaux, des eaux domestiques [69] ;

II.3.8. Généralités sur les membranes :

Les procédés à membranes, industrialisés à partir des années soixante, se développent encore à un rythme rapide. Il existe maintenant une grande variété de membranes adaptées à divers procédés de séparation. Cette diversité est à l'origine des applications dans des domaines très différents [59].

II.3.8.1. Définition de la membrane:

Une membrane peut être définie comme étant une couche mince de matière, permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert (voir figure II.8) [70].

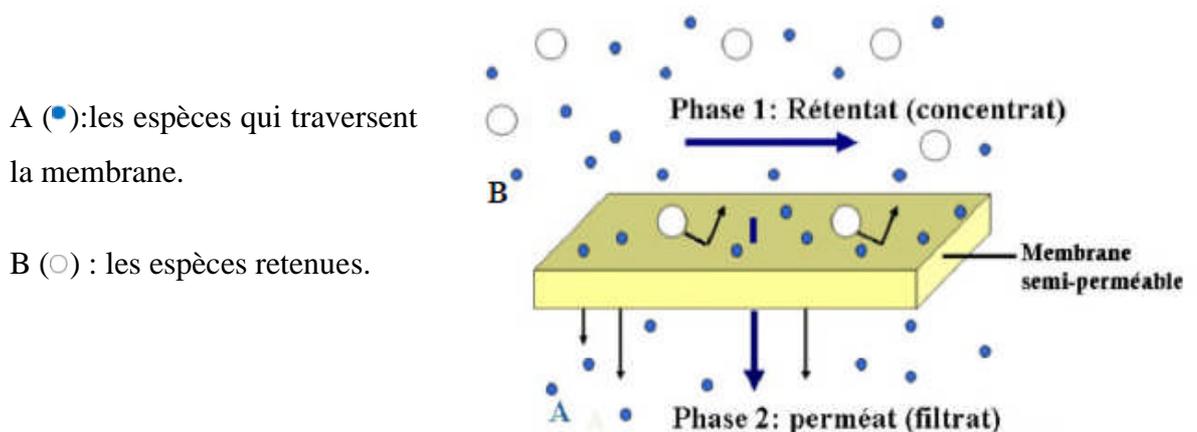


Figure II.8: Principe de fonctionnement d'une membrane semi-perméable [71].

II.3.8.2. Classification des membranes :

Le pouvoir de séparation d'une membrane dépend de sa structure poreuse et de la nature du matériau membranaire [59].

a. Classification d'après la morphologie :

Les membranes peuvent être classées en fonction de leur structure (figure II.9) :

a.1. Membranes symétriques (structure isotrope): Elles sont constituées d'un seul matériau (même structure sur toute leur épaisseur) [59]. Ce sont des membranes pour lesquelles la distribution des diamètres de pore est régulière et uniforme dans toute l'épaisseur du matériau membraneux (la taille des pores étant homogène), leur inconvénient majeur est qu'elles se colmatent facilement [55].

a.2. Les membranes asymétriques (ou anisotropes) : Les membranes ont une structure asymétrique, c'est-à-dire qu'elles sont constituées d'une couche superficielle très mince (0,1 à 0,5 μm d'épaisseur) de très fine porosité et d'une sous-couche plus épaisse de porosité beaucoup plus large. La séparation a lieu dans la couche superficielle tandis que la sous-couche confère une résistance mécanique à la membrane.

Les deux couches peuvent être faites de différents matériaux de structure ou de nature différente comme c'est le cas pour les membranes composites [70].

La plupart des membranes commerciales de MF, UF et de NF sont des membranes à structure asymétrique car ce type de structure permet d'avoir des perméabilités plus élevées [59].

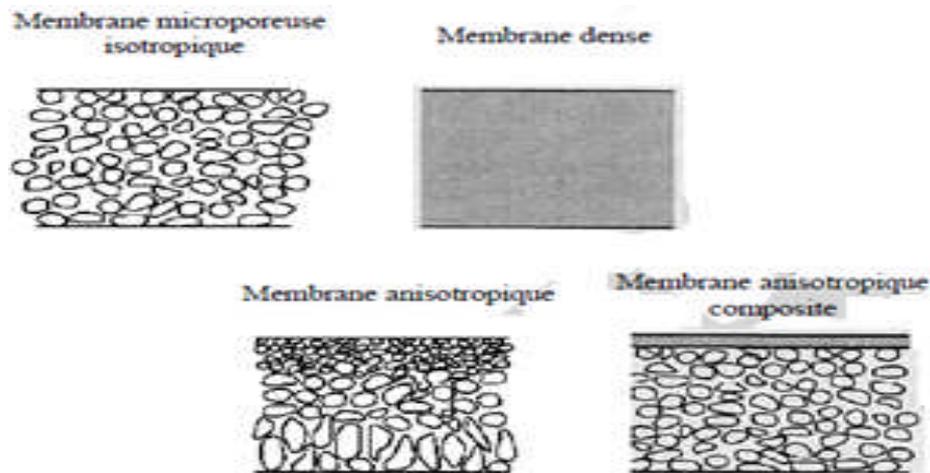


Figure II.9: Description des différents types de membrane [59].

b. Matériaux :

b.1. Les matériaux organiques : Ce sont des polymères d'origine naturelle, réticulés ou non, peu chers mais faiblement résistants; leurs principaux avantages sont :

- ✓ Une mise en œuvre aisée ;
- ✓ Une disponibilité dans toutes les tailles de pores ;
- ✓ Un faible coût de production ;

b.2. Membranes minérales ou inorganiques : Elles sont largement répandues car elles sont très sélectives, très perméables et peuvent être soumises plus facilement à des procédés de nettoyage assez agressifs sans trop être altérées. Elles ont une excellente résistance chimique, mécanique et surtout thermique [57].

b.3. Membranes composites : Elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques, organo-minérales ou minérales.

b.4. Membranes échangeuses d'ions : Ces types de membranes ont une charge positive (échangeuses des anions) ou négative (échangeuses des cations) [57]. Elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge [43].

II.3.8.3. Durée de vie d'une membrane :

Il est très difficile de déterminer exactement la durée de vie d'une membrane. En effet, la durée de vie dépend de la nature de la membrane mais aussi des conditions d'utilisation :

- ✓ Pression de fonctionnement ;
- ✓ Température de l'eau ;
- ✓ pH ;
- ✓ Qualité du prétraitement [72,73];

II.3.8.4. Protection des membranes :

Le prétraitement de l'eau avant les étapes de nano filtration et d'osmose inverse est très important car l'encrassement de la membrane peut facilement perturber le procédé de purification. Le prétraitement est aussi important pour les étapes de micro et d'ultrafiltration. Pour éviter l'obstruction et l'endommagement des membranes par des particules dures et pointues, l'eau a besoin d'être pré-filtrée avant une micro ou une ultrafiltration. Les pores de l'unité de pré filtration doivent être choisis selon la composition des eaux [15].

II.3.9. Les modules membranaires:

II.3.9.1. Définition des modules:

Un module est la plus petite unité qui peut être changée dans un système industriel. Il s'agit d'un assemblage de membranes avec une entrée et des sorties [59].

II.3.9.2. Types de modules :

Une installation d'ultrafiltration met en œuvre un ensemble de membranes organisées en module. Suivant la mise en forme, on distingue quatre catégories de modules [68]:

a. Les modules tubulaires:

Un module tubulaire contient plusieurs tubes de diamètre 6 à 25 mm et de longueur de 1 à 2m. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes (figure II.10) [43].

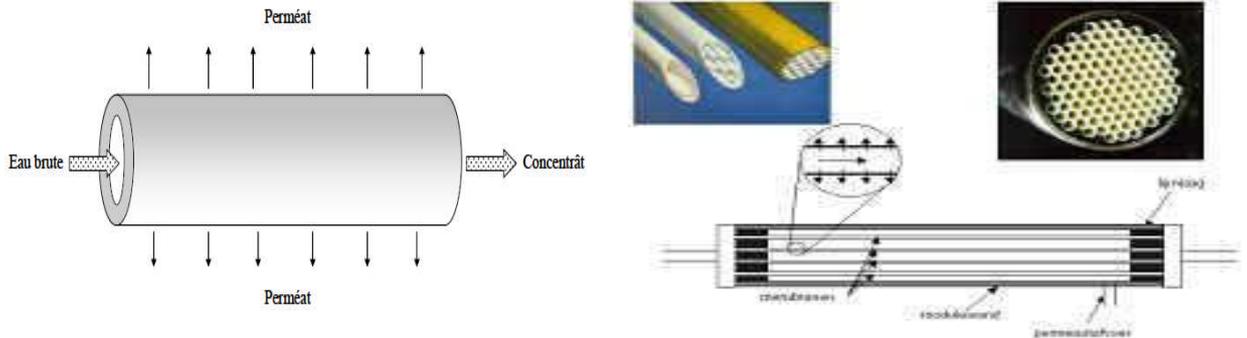


Figure II.10: Module tubulaire [43,57].

b. Les modules plans :

Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides (figure II.11) [74].

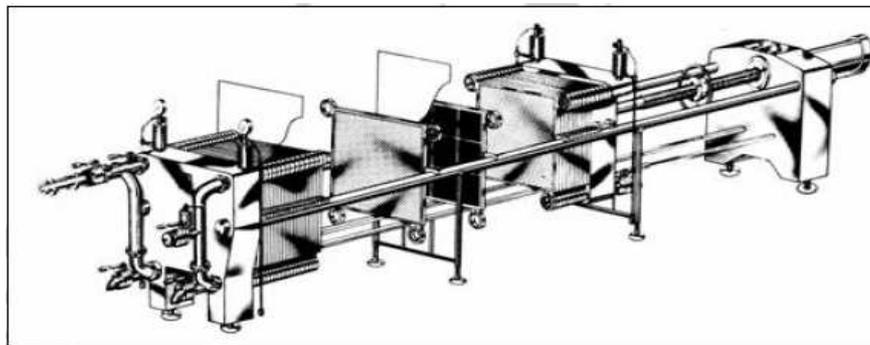


Figure II.11: Module à plaque [57].

c. Modules à fibres creuses :

Ces modules sont constitués de quelques milliers jusqu'à plusieurs millions de membranes tubulaires de très petit diamètre (< 2mm) appelées fibres creuses [59]. La peau est localisée à l'intérieur ou à l'extérieur de chaque fibre selon que le perméat est collecté à l'extérieur ou à l'intérieur des fibres [57].

d. Modules spiralés :

Elles sont composées d'enveloppes membranaires planes enroulées de façon serrée autour d'un tube collecteur de perméat (figure II.12). Les modules industriels ont un diamètre de 0,2 m et une longueur de 1 m [75].

Ils sont cependant sensibles au colmatage et sont difficiles à nettoyer [43].

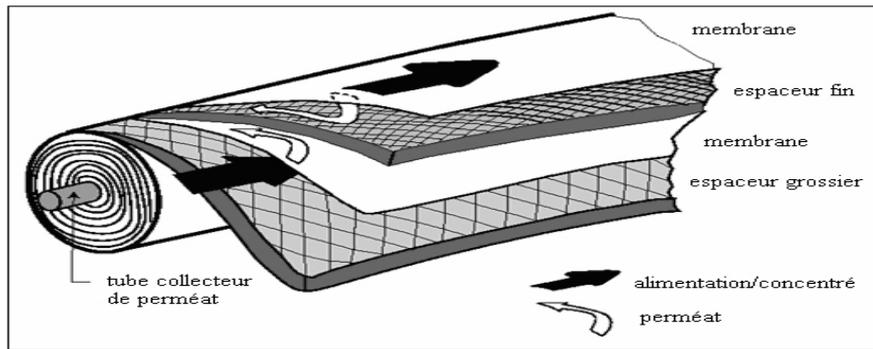


Figure II.12: Module spiralé [75].

Les modules les plus utilisés actuellement dans le domaine de l'eau potable sont les modules à fibres creuses (UF et MF) et les modules spiralés (NF et OI) [70].

II.3.10. Types de filtration :

Dans les procédés de séparation membranaire, il existe deux modes de filtration : une filtration frontale et une filtration tangentielle (figure II.13) [43].

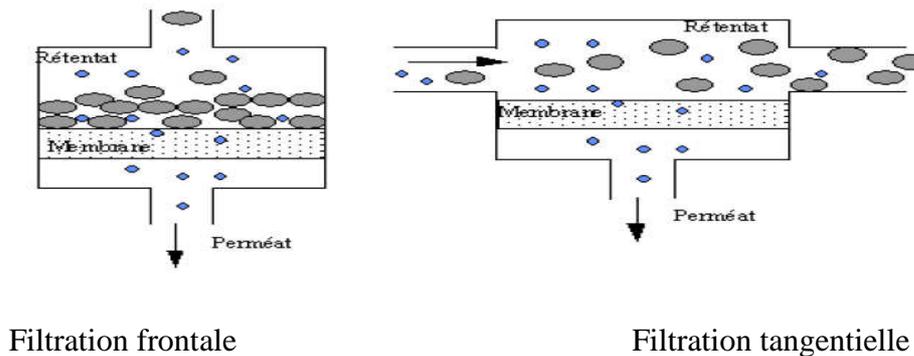


Figure II.13: Types de filtration [76].

II.3.10.1. Filtration tangentielle :

En filtration tangentielle, le fluide à traiter entre dans le module pour venir au contact de la membrane suivant un flux tangentiel. Dans ce mode de mise en œuvre, il y a donc nécessairement une entrée correspondant à l'alimentation et deux sorties que sont : le perméat et le concentrât comme l'illustre la figure (II.14) [43].

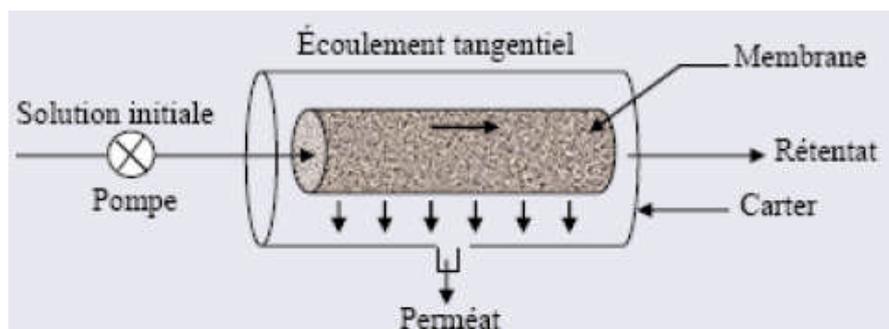


Figure II.14: Schéma de principe de la filtration tangentielle [71].

II.3.10.2. Filtration frontale :

En filtration frontale, l'écoulement se fait dans la direction perpendiculaire à la surface de la membrane. Ce système de filtration comporte une entrée pour le fluide à traiter et une sortie pour le produit filtré (figure II.15) [43].

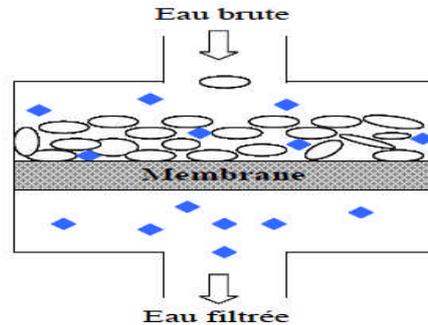


Figure II.15: Schéma de principe de la filtration frontale [43].

Dans ce mode de filtration, l'accumulation de matières à la surface de la membrane gêne la filtration. En effet, toutes les espèces dissoutes ou en suspension sont entraînées vers la surface de la membrane et les espèces retenues s'y s'accumulent très rapidement pour former un gâteau favorisant ainsi le colmatage et par conséquent une baisse importante de flux comme l'illustre la figure (II.15).

Le principal avantage de l'écoulement tangentiel, par rapport à l'écoulement frontal, est le fait que le mouvement tangentiel de l'alimentation balaie la surface de la membrane limitant ainsi l'accumulation des particules et réduit par conséquent le processus de colmatage. Ce balayage accélère la remise en suspension des particules déposées ou accumulées à proximité de la membrane. C'est pour cette raison que l'écoulement tangentiel est très répandu dans les applications industrielles [43].

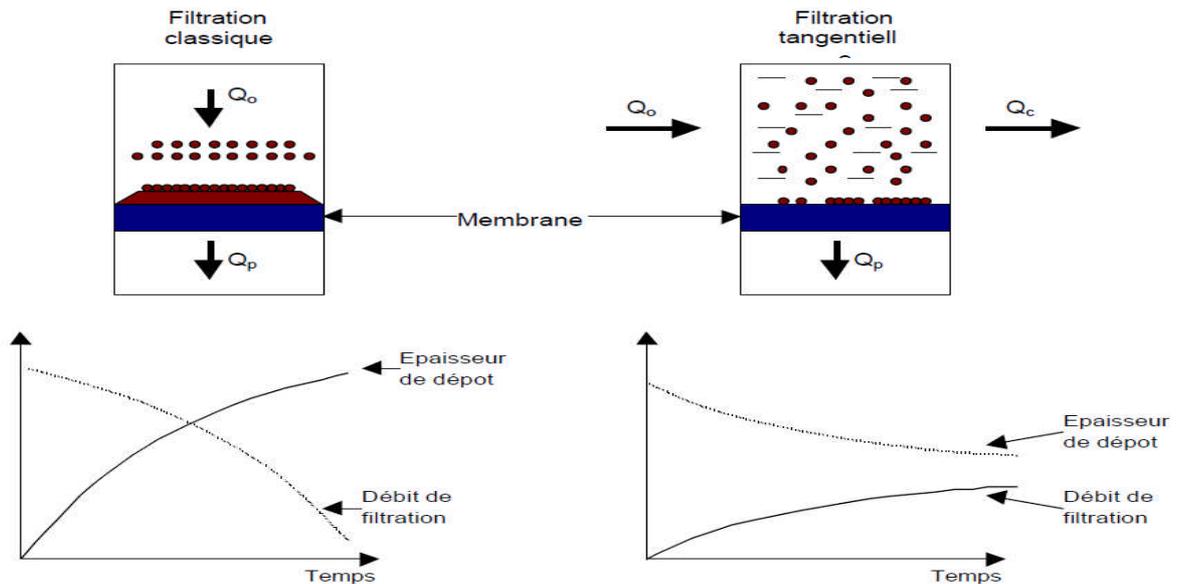


Figure II.16: Comparaison entre filtration frontale et filtration tangentielle [44].

En mode frontal, le flux de perméat baisse rapidement car l'accumulation des particules en amont de la membrane provoque la formation d'un gâteau. La mise en place d'une filtration tangentielle limite l'épaisseur, et le flux de perméat reste constant jusqu'à ce que le colmatage minéral réduise le diamètre des pores [4].

II.3.11. Choix du type de module, de membrane :

II.3.11.1. Choix du type de module :

Le choix du type de module dépend d'un certain nombre de critères, liés au contexte industriel.

- ✓ Le dispositif qui assure l'étanchéité entre les compartiments d'eau à traiter et de perméat ;
- ✓ Leur plus ou moins grande facilité de montage et de démontage [44].

II.3.11.2. Choix du type de membrane :

Différents types de membranes peuvent être utilisés pour l'ultrafiltration. Le choix d'une membrane est déterminé par un grand nombre de critères, notamment la capacité nécessaire et la qualité de l'eau à filtrer [77].

Si la source d'eau brute est une eau de surface, la membrane doit être choisie en fonction de son aptitude à enlever les virus et sur le niveau d'abattement du MES.

Si la source d'eau brute est une eau souterraine, la membrane doit être choisie en fonction de l'aptitude à enlever les sels [44].

II.3.12. Les paramètres caractéristiques de la membrane UF :

La solution à traiter (débit Q_a) se divise au niveau de la membrane en deux parties :

- ✓ une partie qui passe à travers la membrane ou perméat (débit Q_p) ;
- ✓ une partie qui ne passe pas à travers la membrane, appelée concentrât ou retentât (débit Q_c), et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane.

La fraction de débit du liquide qui traverse la membrane est appelée taux de conversion de l'opération de séparation [78]:

$$Y = Q_p / Q_a \quad (\text{II.1})$$

Les membranes sont en général caractérisées par :

- ✓ La sélectivité ;
- ✓ La perméabilité ;
- ✓ Leur seuil de coupure ;

II.3.12.1. La sélectivité :

La sélectivité d'une membrane est en général définie par le taux de rejet ou taux de rétention (TR) d'une espèce que la membrane est censée retenir [43]. C'est une caractéristique de surface de la membrane.

L'efficacité d'une membrane d'ultrafiltration est caractérisée par son taux de rétention. C'est-à-dire par sa capacité à retenir le soluté et à laisser passer le maximum de solvant à travers la membrane [57].

Le taux de rejet est donné par la relation suivante :

$$TR = \frac{C_a - C_p}{C_a} = 1 - \frac{C_p}{C_a} \quad (II.2)$$

Avec :

C_a : concentration de l'espèce dans la solution à traiter.

C_p : concentration de la même espèce dans le perméat [79].

II.3.12.2. Notion de seuil de coupure:

Le seuil de coupure d'une membrane est défini comme la masse molaire du plus petit composé retenu à 90 % par la membrane. Il s'exprime en g/mol ou bien en Dalton (Da) et la classification des membranes en fonction de leur seuil de coupure est très répandue dans le domaine commercial.

Plus le seuil de coupure est faible, plus la membrane est capable de retenir de petites molécules ou colloïdes. A l'inverse, plus le seuil de coupure est grand, moins la membrane peut retenir de petites molécules [30].

Dans le cas de l'ultrafiltration, l'efficacité de la membrane est, en général, caractérisée par le seuil de coupure [44].

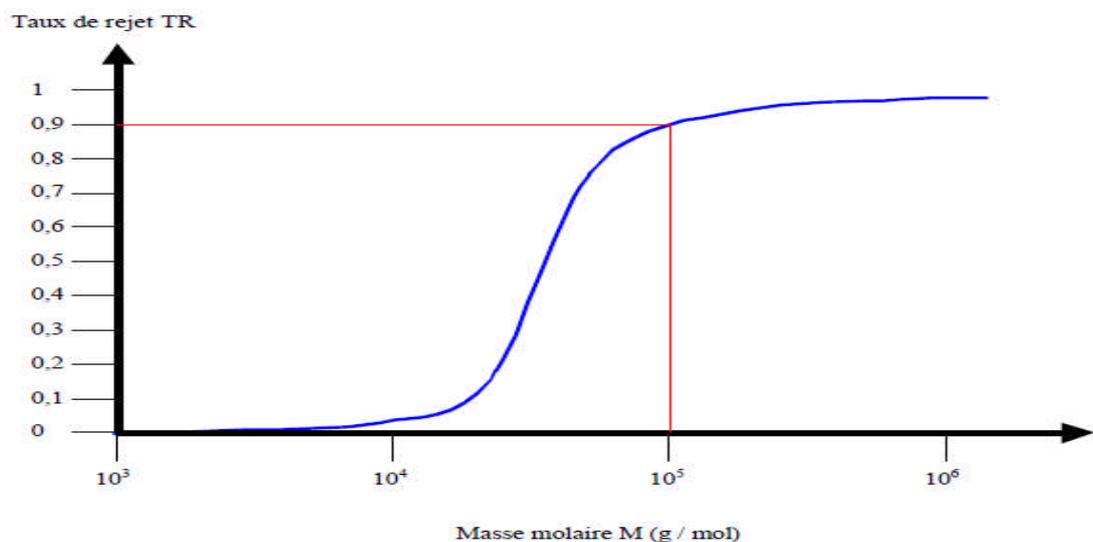


Figure II.17: Caractérisation de la sélectivité d'une membrane d'ultrafiltration [44].

II.3.12.3. Perméabilité :

La perméabilité dépend principalement de la taille des pores ainsi que de l'épaisseur de la membrane pour les membranes poreuses.

La perméabilité d'une membrane est définie par le débit d'eau passant à travers celle-ci ou débit de perméat par unité de surface (S) sous l'action d'une pression transmembranaire moyenne ΔP_M de 1 Pa. L'ultrafiltration est aujourd'hui la meilleure approche pour supprimer la turbidité de l'eau ainsi qu'une fraction des substances humiques [30].

II.3.13. Phénomènes de colmatage:

Le colmatage des membranes est le problème le plus aigu des problèmes rencontrés en filtration membranaire.

Le colmatage découle de l'accumulation de matières à la surface des membranes. D'autres conséquences directes ou indirectes du colmatage sont une diminution de la vie active des membranes, des lavages plus fréquents, et donc des consommations de produits chimiques plus importantes et des dépenses supplémentaires d'énergie pour compenser la baisse de perméabilité des membranes causée par le colmatage.

Dans les modèles de colmatage proposés par plusieurs auteurs, les chercheurs considèrent qu'il y a d'abord un blocage/obstruction de pores, suivi par la croissance d'un gâteau à la surface de la membrane [59].

II.3.13.1. Mécanismes de colmatage en UF :

Le colmatage des membranes d'UF peut être considéré par un ou plusieurs des mécanismes suivants (figure II.18).

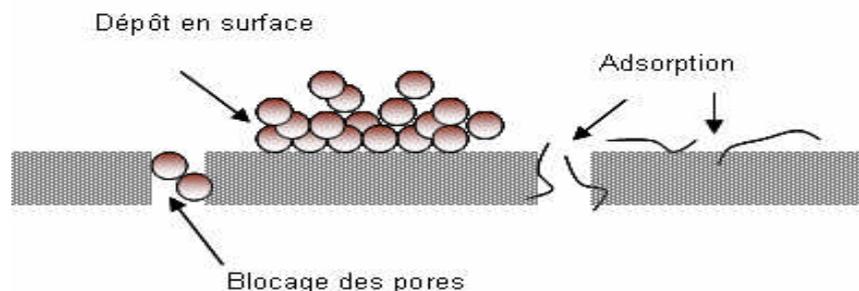


Figure II.18: Schématisation des différents mécanismes de colmatage en UF [5].

❖ Dépôt de matières en surface : Ce mécanisme intervient lorsque la solution à traiter contient des MES, et/ou colloïdales. Ces matières constituent alors une couche poreuse appelée gâteau de filtration ou dépôt dans lequel peuvent venir aussi s'y accumuler des MO.

❖ Blocage des pores : Il s'agit de la pénétration et du blocage, partiel ou total, des pores de la membrane par des MES, dont la taille est proche de celle des pores de la membrane [5].

❖ Adsorption : Les solutés ayant une affinité physico-chimique pour le matériau membranaire peuvent s’y adsorber. Des lavages chimiques sont nécessaires afin de casser les liaisons soluté-membrane [5].

II.3.13.2. Estimation du potentiel de colmatage :

Pour caractériser le colmatage des membranes d’osmose inverse, différentes méthodes d’évaluation du potentiel de colmatage d’une eau ont été développées. Les plus utilisées sont le Silt Density Index (SDI) et le Modified Fouling Index (MFI) [5].

a. SDI (Silt Density Index) :

Il permet de déterminer le pouvoir colmatant d’une eau. L’eau est filtrée à travers un filtre (seuil de coupure de 0.45 µm) sous une pression constante de 2.1 bars. Lors de ce test, deux mesures sont effectuées en vue de calculer l’indice de colmatage : mesure du temps nécessaire à filtrer 500 ml d’eau à T=0 min (on obtient T₀) et mesure du temps de filtration du même volume après 15 min de filtration continue sur le filtre (on obtient T₁₅) [80].

L’indice est calculé de la manière suivante :

$$SDI_t = \frac{\left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) * 100}{t} \tag{II.3}$$

Avec :

SDI: Silt Density Index (%min⁻¹).

t₁ : temps initial pour filtrer un échantillon de 500 ml (sec).

t : temps après le départ de la mesure (min).

t₂ : temps pour filtrer un échantillon de 500 ml après le temps T (sec) [5].

Tableau II.3: Valeurs repère du SDI [81].

Colmatage	Peu ou pas de colmatage	Colmatage classique	Colmatage excessif
SDI	SDI < 3	3 < SDI < 5	SDI >5

II.3.13.3. Prévention du colmatage :

Au niveau du prétraitement, la prévention du colmatage peut prendre les formes suivantes:

- ✓ Pré-filtration;
- ✓ Ajout d’un agent antitartre pour empêcher le dépôt de sels à la surface des membranes.
- ✓ Enlèvement plus poussé des particules et des colloïdes par un autre procédé membranaire ou par un traitement conventionnel ;

- ✓ Ajustement de pH (acidification) pour déplacer les équilibres de solubilité des sels susceptibles de précipiter (sels de fer, de manganèse, de calcium, de baryum) [75];

II.3.14. Techniques de nettoyage des membranes :

Il y a différentes méthodes pour nettoyer les membranes, tels qu'un rinçage "vers l'avant", un rinçage "vers l'arrière" et un rinçage "à l'air" (figure II.19).

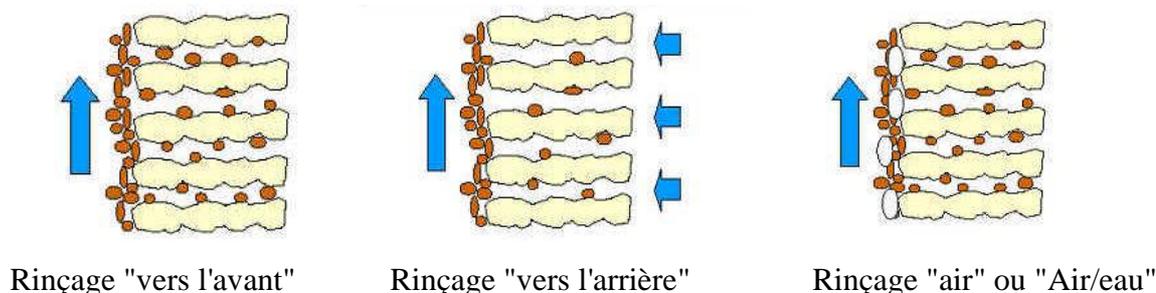


Figure II.19: Techniques de nettoyage des membranes [15].

Lors d'un procédé de nettoyage chimique, les membranes sont trempées dans une solution d'eau de javel, de peroxyde d'hydrogène ou de produits chimiques, tels que l'acide chlorhydrique (HCl) et/ou l'acide nitrique (HNO₃). Les membranes trempent d'abord dans la solution pendant quelques minutes et ensuite on effectue un rinçage (vers l'avant ou vers l'arrière) ce qui permet de rincer les contaminants. Dans la pratique, la méthode qui convient le mieux est déterminée par des essais [15].

a. Eau utilisée pour le nettoyage:

Idéalement l'eau de nettoyage des membranes (eau de rinçage ou eau de préparation des solutions) doit satisfaire de façon générale à des conditions bien déterminées.

Si l'eau disponible dans l'installation est entartrante ou agressive, on devra la traiter. Pour des applications dans le secteur agroalimentaire, la qualité microbiologique de l'eau doit être surveillée [57].

II.4. Conclusion :

L'ultrafiltration est donc un procédé connu et étudié depuis plusieurs années et qui connaît de plus en plus d'applications industrielles.

Cette technique est appelée à connaître un développement important lié aux exigences croissantes de qualité; en particulier, dans le traitement des eaux.

L'ultrafiltration est un procédé de séparation, performant, sûr, facile à conduire mais pas simple à mettre au point et à dimensionner. La cause de ces difficultés est le colmatage qui rend le procédé très sensible à la qualité des prétraitements. Il reste difficile à éviter ou à limiter.

Chapitre III

*Théorie de la coagulation-
floculation et décantation*

CHAPITRE III

**THEORIE DE LA COAGULATION- FLOCCULATION ET
DECANTATION****III.1. INTRODUCTION :**

L'un des objectifs majeurs du traitement de l'eau, c'est de la clarifier, c'est-à-dire d'éliminer les matières en suspension qui la troublent. La décantation préliminaire peut contribuer à un degré non négligeable à cette clarification, mais elle ne supprime pas toutes les matières aptes à se sédimenter, elle n'élimine ni les colloïdes ni les matières qui confinent au domaine colloïdal. Ces colloïdes ou quasi-colloïdes sont tantôt de nature minérale, comme les particules argileuses ou siliceuses, tantôt de nature organique, comme les débris fibreux et les macromolécules d'origine végétale. Parmi ces dernières, il faut signaler les matières humiques qui, tout en contribuant à la turbidité de l'eau, lui confèrent les teintes jaunâtres ou brunâtres qu'on observe souvent. Il faut considérer aussi les virus, les bactéries et les autres microorganismes de fine taille dont la suppression est primordiale.

Il est facile d'éliminer quasi entièrement ces diverses substances de nature colloïdale. [82] Pour ce faire, on a souvent recours aux procédés physico-chimiques pour modifier l'état initial des corps présents dans l'eau et créer des conditions favorables à leur décantation, d'où la technique de la coagulation-floculation [2].

III.2. LES PARTICULES EN SUSPENSION :

Les matières existent sous les trois états : en suspension, dissous ou colloïdal, qui, dans une eau brute à traiter, proviennent généralement de l'érosion des sols, de la dissolution des substances minérales, de la décomposition des matières organique et de déversement des eaux résiduaires urbaines et industrielles ainsi que des déchets agricoles.

On peut classer ces matières selon leur taille comme suit :

-Les particules dont le diamètre est supérieur à $1\mu\text{m}$ qui sont d'origine organique (produits de la biodégradation végétale et animale) et minérale (sable, gravier, argile). Comme leur diamètre est relativement élevé, ces particules se déposent facilement.

-Les particules dont le diamètre est inférieur à $1\mu\text{m}$ qui sont des particules colloïdales soit d'origine minérale responsables de la turbidité soit d'origine organique responsables de la couleur. Puisque le diamètre de ces particules est extrêmement faible, elles se reposent très lentement [83].

-Les matières dissoutes, sont généralement des cations ou anions de quelques nanomètres de diamètre [84].

III.3. Nature et propriétés des colloïdes :

Le terme colloïde est proposé par Thomas Graham en 1861. Il provient des mots grecque *KOΛΛΟ* (Kolla) qui signifie *colle*, et *Eΐω* (eido) ou *EΐωofJoΐ* (eidomei) qui signifie *comme* [85].

Les particules colloïdales sont des matières inertes ou vivantes (argiles, hydroxydes métalliques, micro-organisme, fibres, pulpes, protéines, etc....) qui ont une taille très petite comprise entre 1nm et 1 μ m [86].

Dans une même solution tous les colloïdes ont la même charge [87]. La plupart de ces particules développent des charges primaires négatives qui engendrent les forces de répulsion inter colloïdales responsables de la grande stabilité de ces particules dans leur milieu aqueuse [88].

Ces charges peuvent avoir des origines selon les caractéristiques du milieu aqueux et l'état initial des particules, elles peuvent provenir soit par ionisation ou solvatation des molécules qui les constituent, soit par adsorption sélective d'anions existant dans l'eau [83].

III.3.1. Les types de colloïdes :

Les particules colloïdales sont classées en deux catégories suivant leur comportement vis-à-vis de l'eau. Il s'agit des particules hydrophobes et hydrophiles [84].

III.3.1.1. Les colloïdes hydrophiles :

Ces particules présentent une grande affinité avec l'eau [84]. Les particules hydrophiles déshydratées se dispersent spontanément dans l'eau et sont entourées de molécules d'eau qui préviennent tout contact ultérieur entre ces particules [19].

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 [84].

III.3.1.2. Les colloïdes hydrophobes :

Les particules hydrophobes ne sont pas entourées de molécules d'eau, leur dispersion dans l'eau n'étant pas spontanée. On doit la faciliter à l'aide de moyens chimiques ou physiques. Ce sont en général des particules minérales telles que la silice et les argiles [19].

III.3.2. La théorie de la double couche :

Les colloïdes sont généralement chargés négativement. Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés sont attirés et forment une couche autour du colloïde. Diverses théories expliquent ce phénomène :

- 1- Théorie de Helmholtz : une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche fixée) ;
- 2- Théorie de Gouy-Chapman : la couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde ; la neutralité est obtenue à une plus grande distance (couche diffuse) ;
- 3 -Théorie de Stern qui combine les deux théories précédentes et considère la formation d'une double couche : la première formée d'ions du liquide mais adhérente au colloïde, la seconde diffuse dans le liquide environnant. Comme illustré sur la figure (III.1), le potentiel subit une première chute significative dans la couche fixée, puis diminue plus lentement [89].

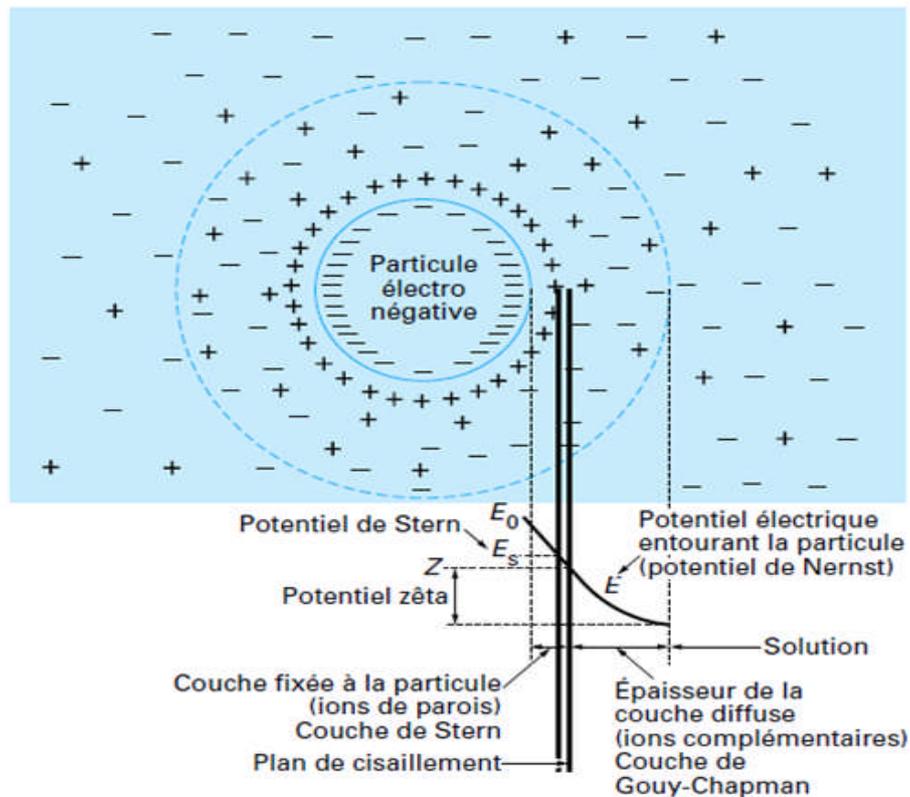


Figure III.1: Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électro-négative [90].

Deux particules colloïdales se repoussent. Elles sont soumises à deux types de force de directions opposées :

- Force d'attraction gravitationnelle de VAN DER VAALS (FA) liée à la surface spécifique et à la masse des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu.
- Force de répulsion électrostatique (FR), liée aux charges superficielles des colloïdes et donc à leur potentiel zêta (pZ).

Si $FA > FR$, l'agrégation se produit.

Si $FR > FA$, il y a principalement la répulsion entre les particules colloïdales.

L'énergie totale d'interaction (E) entre les particules colloïdales est la somme de l'énergie répulsive (ER) due au potentiel électrique et l'énergie attractive (EA) (figure III.2).

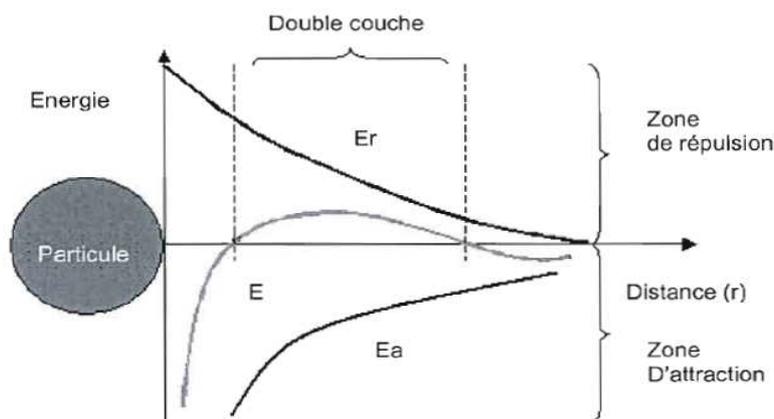


Figure III.2: Effet de la distance entre deux particules colloïdales sur la force de répulsion électrostatique (E_r), la force d'attraction moléculaire (E_a) et la force résultante (E) [91].

III.3.3. Le potentiel Zêta :

Le potentiel Zêta et le potentiel existant sur la surface de la couche de Stern (potentiel à la surface du plan de cisaillement).

Théoriquement, la coagulation se produit à l'annulation de ce potentiel, ce qui correspond à une complète neutralisation de charge. Mais, en pratique, ce n'est pas nécessaire; il suffit que ce potentiel soit légèrement négatif. Il faut faire attention à ne pas trop ajouter de coagulant, car la surface de la particule va alors se trouver chargée positivement (potentiel Zêta positif) et les colloïdes vont se disperser à nouveau [14].

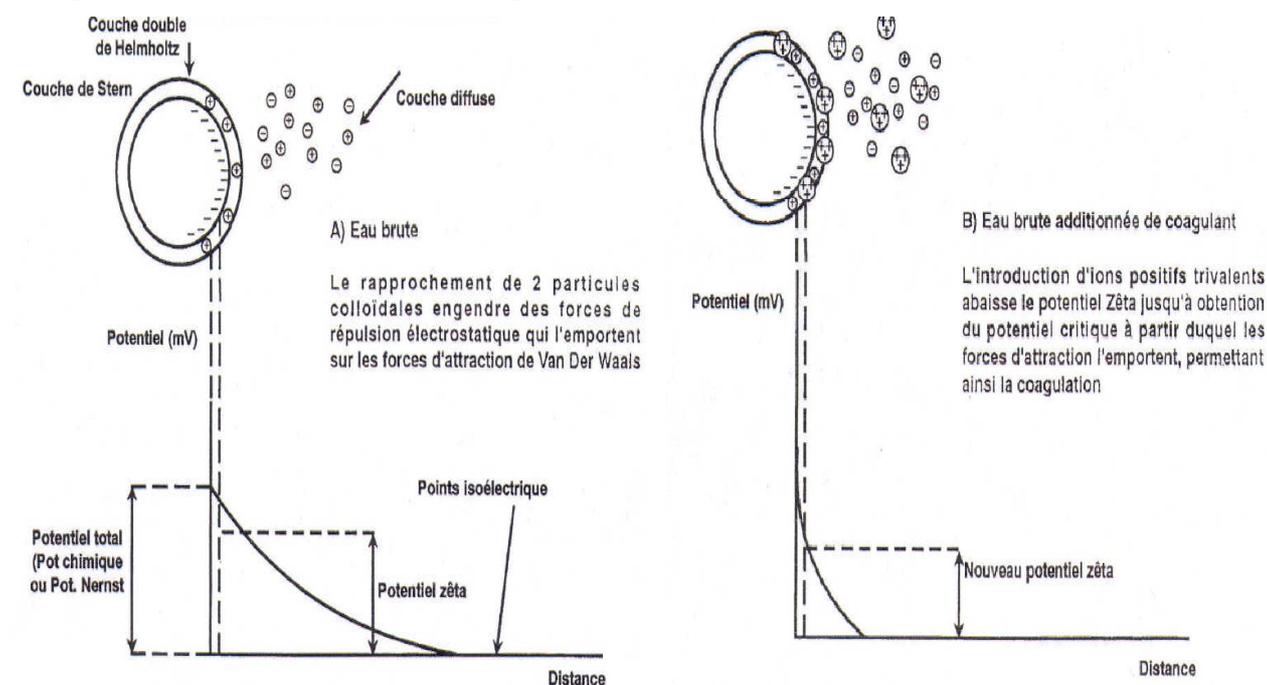


Figure III.3: Potentiel zêta en fonction de l'éloignement de la particule [92].

On a le potentiel zêta (ξ): $\xi = 4q \epsilon \pi / D$ (III.1)

e : épaisseur de la couche diffuse.

q : charge de la particule par unité de surface.

D : constante diélectrique du milieu.

III.4. Coagulation floculation :

III.4.1. Définition :

La coagulation floculation est un procédé physico-chimique de clarification des eaux. L'objectif principal est l'élimination des matières non décantables qui se trouvent dans l'eau sous forme colloïdes (figure III.4) [7].

La coagulation consiste à les déstabiliser. Il s'agit de neutraliser leurs charges électrostatiques de répulsion pour permettre leur rencontre par addition d'un réactif chimique, le coagulant.

La floculation est l'agglomération de ces particules déchargées en micro-floc, puis en flocons volumineux et décantables. Cette floculation peut être améliorée par l'ajout d'un autre réactif, le floculant [25].

L'adjonction du coagulant produit dans un premier temps un ensemble de réactions complexes d'hydrolyse, d'ionisation et également de polymérisation et dans un second temps, une déstabilisation des colloïdes par un ensemble de mécanismes complexes [93].

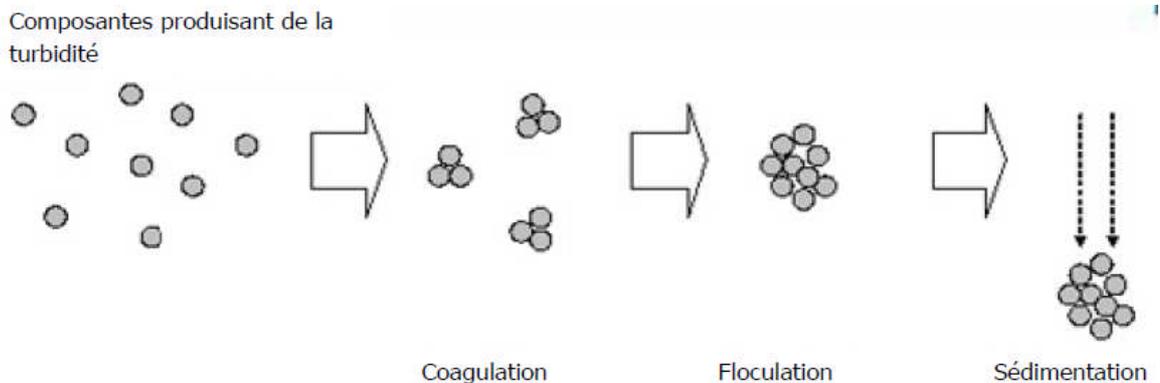


Figure III.4: Processus de coagulation, floculation et de sédimentation [94].

III.4.2. Technologie de la coagulation- floculation :

III.4.2.1. Stratégie :

Dans un premier temps, un mélange rapide est nécessaire pour disperser les additifs dans la totalité du volume d'eau à traiter. L'injection se fait dans une zone de turbulence créée par des chicanes ou par mélange mécanique avec des palefs ou hélices. La deuxième phase favorise les contacts entre les particules de floc sans les léser. Le mélange doit être néanmoins

assez énergétique pour engendrer des différences de vitesse dans le bassin nécessaire à la rencontre des particules (figure III.5) [95].

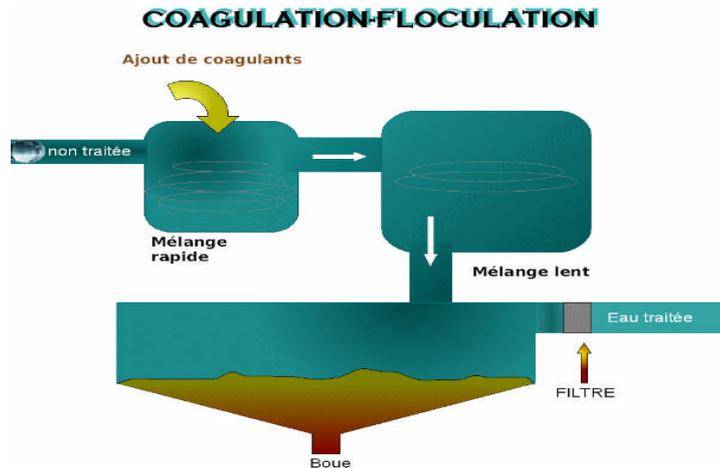


Figure III.5: Coagulation-floculation [96].

III.4.2.2. Choix du coagulant et/ ou floculant :

Dans la séparation liquide/solide par coagulation-floculation, le choix des coagulants et/ ou floculants est très large et son influence est grande sur les procédés envisagés pour effectuer la séparation et pour limiter la quantité des boues produites [14].

Les coagulants utilisés pour le traitement des eaux destinées à l'alimentation humaine doivent :

- ✓ être peu coûteux ;
- ✓ être totalement inoffensifs par eux-mêmes et par les produits qu'ils forment ;
- ✓ pouvoir être mis en œuvre aisément ;
- ✓ être efficaces: car réduire la couleur, la turbidité et les MO d'une eau est essentielle ;
- ✓ pouvoir être dispersés sans difficultés [90];

III.4.2.3. Application dans le traitement des eaux :

La coagulation a été appliquée dans :

- Une filière classique de traitement de l'eau potable [97], le traitement des eaux destinées à la consommation pour éliminer les particules colloïdales en suspension responsables de la turbidité et la coloration des eaux [83].
- Les chaînes de traitement physico-chimiques des eaux usées domestiques, afin d'éliminer les matières colloïdales en suspension, avant de traiter les eaux au charbon actif.
- Prétraitement d'eaux usées qui contiennent beaucoup de graisses.
- L'industrie textile : qui consiste à éliminer la coloration.
- Amélioration des odeurs et des goûts par l'élimination des matières organiques [98].

III.4.3. La coagulation :**III.4.3.1. Principe :**

Le mot coagulation vient du latin coagulare qui signifie « agglomérer » [99].

La coagulation consiste à supprimer par une injection bien précise des produits coagulant toutes les forces de répulsion qui favorisent la formation d'états stables des particules colloïdales dans l'eau [83].

La coagulation maximale sera obtenue pour le point de potentiel Zêta nul [100].

III.4.3.2. Mécanismes de la coagulation :**III.4.3.3. Paramètres liés à la coagulation:**

Pour arriver à un bon rendement de coagulation [83], il faut tenir compte de plusieurs variables en relation, comme le pH, la dose de coagulant, les conditions de mélange et la température [14].

Ces variables sont liées à la qualité de l'eau à traiter : le pH, la turbidité, la couleur, les sels dissous et la température. D'autres sont liés au traitement lui-même : la nature, la dose du coagulant et le mode d'injection [84].

a. L'influence de la turbidité :

La turbidité est un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de coagulation [101].

La turbidité d'une eau est principalement due à la présence de particules de diamètre de 0,2 à 5 μm et qui sont facilement décantables après coagulation floculation lorsqu'on maintient le pH dans sa plage optimale [83].

Quand la turbidité de l'eau est trop faible, on peut augmenter la concentration en particules par addition d'argiles [102].

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 [14].

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. Pour se placer au pH optimal, il est possible d'ajouter un acide ou une base. Une dose de coagulant excessive entraîne une ré-stabilisation des particules et augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité de l'eau traitée insuffisante. La quantité de réactifs ne peut se déterminer facilement. Pratiquement, la dose optimale de coagulant peut être déterminée par un test au laboratoire, connu sous le nom de "Jar-Test" [14].

c. L'influence des conditions de mélange :

Lors de l'introduction des produits chimiques dans l'eau et pour augmenter le rendement et l'efficacité de la déstabilisation des particules en suspension, on procède à une agitation qui peut être faite en deux étapes [83].

Il faut associer dans un temps assez court, deux phases distinctes et incompatibles. En effet, les conditions de mise en œuvre de la coagulation sont différentes de celles de la floculation. On distingue les phases suivantes:

- ✓ Première phase : mélange rapide et vigoureux est nécessaire pour disperser les additifs dans la totalité du volume d'eau à traiter.
- ✓ Deuxième phase : mélange lent favorise les contacts entre les particules de floc sans les léser [1].

d. Influence des sels dissous :

Dans la coagulation et la floculation, les sels dissous dans une eau modifient la plage de pH optimale, le temps requis pour la floculation, la quantité de coagulant requis et la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent [102].

e. L'influence du pH :

Le pH a une influence primordiale sur la coagulation [14]. Selon les caractéristiques d'une eau, il existe un pH optimal permettant la meilleure coagulation [89], elle est fonction du coagulant utilisé, de la concentration et de la composition de l'eau à traiter [84].

Il est d'ailleurs important de remarquer que l'ajout d'un coagulant modifie souvent le pH de l'eau. Cette variation est à prendre en compte afin de ne pas sortir de la plage optimale de précipitation du coagulant [14].

En effet, une coagulation réalisée à un pH non optimal peut entraîner une augmentation significative du temps de coagulation. En général, le temps de coagulation est compris entre 15 secondes et 3 minutes [101].

Les floes sont des précipités d'hydroxydes de métaux. Leur formation et leur stabilité dépendent donc du pH [84].

f. L'influence de la température :

La température joue un rôle important lors la coagulation [14]. Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de la viscosité [84], ce qui explique les difficultés dans le déroulement du processus : la coagulation et la décantation du floc sont ralenties [101], une décroissance de la taille des floes et la solubilité des coagulants est plus faible [84].

Pour éviter ces difficultés, une solution consiste à changer de coagulant en fonction des saisons [102].

III.4.3.4. Coagulant et processus de coagulation :

Les coagulants sont des produits qui neutralisent ou inversent les charges de surface des matières en suspension [2].

L'efficacité de la clarification dépend d'abord du coagulant utilisé. Les plus efficaces sont des sels de métaux, à base d'aluminium ou de fer. Ils sont cités dans le tableau suivant [89] :

Tableau III.1: Dérivés des sels d'aluminium et de fer [102].

Sels d'aluminium	Formule chimique	Sels de fer	Formule chimique
Sulfate d'aluminium	$Al_2(SO_4)_3$	Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3$
Chlorure d'aluminium	$AlCl_3$	Chlorure ferrique	Fe_2Cl_3
Aluminate de sodium	$NaAlO_2$	Sulfate ferreux	$FeSO_4$

Les produits les plus utilisés sont l'alun et le chlorure ferrique. Ces coagulants, une fois introduits dans l'eau, forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation [89].

a. Les sels d'aluminium :

Les coagulants à base de sels d'aluminium permettent d'obtenir une eau traitée très faible en turbidité. La vérification de la dose de coagulant à mettre en œuvre passe par le Jar-Test. Parmi les sels d'aluminium les plus utilisés en coagulation, on peut citer le sulfate d'aluminium [84].

a.1. Le sulfate d'aluminium : L'aluminium est utilisé depuis de très nombreuses années dans le traitement de l'eau potable. Sous forme d'alun (sulfate d'aluminium), il est l'agent coagulant le plus utilisé dans une chaîne de traitement classique. Son addition à l'eau en cours de traitement facilite l'enlèvement de la matière organique, permettant ainsi de réduire la turbidité et faciliter la désinfection de l'eau. De plus, il favorise la réduction de la couleur et la diminution des concentrations de précurseurs de trihalométhanes. La très grande partie de l'alun ajouté est cependant enlevé par les procédés de décantation et de filtration qui suivent son addition [103].

Il est disponible en poudre ou hydratée [14]. C'est un sel, hydraté, commercialisé sous la forme solide $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, il se dissocie dans l'eau en ions aluminium et sulfate, conduisant à des réactions chimiques avec les ions hydroxydes de l'eau. En effet, l'ion

III.4.4. Floculation :

III.4.4.1. But :

La floculation est le processus de grossissement et d'uniformisation des petits flocons formés lors de l'introduction du coagulant. Elle a pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules colloïdales déstabilisées et leur agglomération, pour accroître la taille du floc, son volume, sa masse et sa cohésion [102].

Une bonne floculation est favorisée par:

- ✓ Une coagulation préalable aussi parfaite que possible: la coagulation demeure l'étape préparatoire la plus importante pour la floculation.
- ✓ Une augmentation de la quantité du floc dans l'eau;
- ✓ Un brassage homogène et lent pour tout le volume d'eau;
- ✓ L'emploi de certains produits appelés flocculants [98].

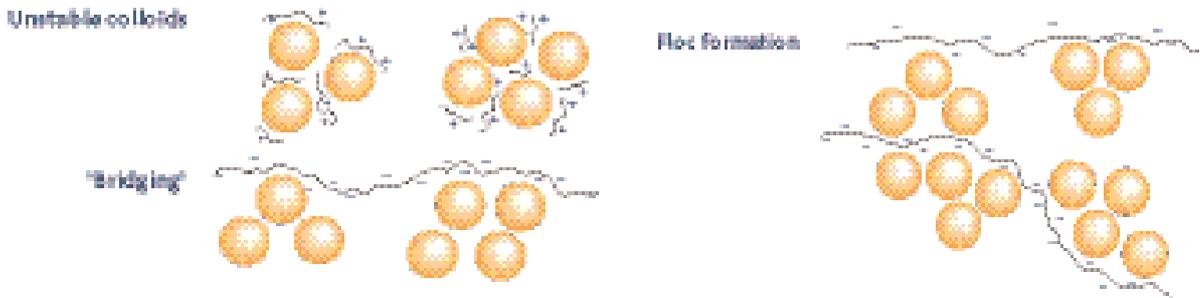


Figure III.6: Agglomération des flocons [106].

III.4.4.2. Les types de floculation :

On distingue trois types de floculation selon le type de mouvement qui anime les particules dans la suspension:

a. Floculation rapide ou pré cinétique (mouvement brownien):

Les contacts entre les particules sont causés par le mouvement aléatoire de celles-ci, dit mouvement brownien qui est fonction de la température de l'eau.

b. Floculation lente ou ortho cinétique (brassage mécanique):

C'est la floculation provoquée par l'agitation de l'eau. Elle est donc causée par le brassage de l'eau qui permet d'augmenter les chances de contact entre les particules.

c. Floculation par entraînement :

Elle se produit dans une solution qui décante quand les grosses particules, tombant plus vite, entraînent les plus petites avec eux [102].

III.4.4.3. Flocculant et processus de floculation :

Pour une meilleure efficacité du procédé de CF, on utilise des flocculants [14].

On appelle floculant, des produits utilisés en quantités plus faibles que les réactifs coagulants [84] permettant d'agglomérer les MES afin d'obtenir une taille plus grande et par conséquent des vitesses de séparation solide liquide plus élevée [2]. Le but étant de former un précipité ou floc qui soit visible et insoluble [84].

Aucune règle ne permet de prévoir le floculant qui donnera le meilleur résultat. Il est toujours nécessaire de faire l'essai au laboratoire [98].

a. Les floculants les plus communément utilisés:

Les floculant les plus communément utilisés sont d'origine minérale (silice activée), organique (alginates ou amidon), ou les floculants de synthèse [10].

a.1. Les floculants minéraux : Ce sont des produits chimiques qui agissent par adsorption ou par neutralisation sur une eau brute qui ne contient pas assez de MES [86].

a.1.1. Le charbon actif : L'usage du charbon actif en poudre demeure une technique très répandue du traitement de l'eau potable. L'utilisation du CAP améliore le goût et l'odeur de l'eau. C'est aussi un adjuvant de floculation pour la phase finale de la coagulation.

Les particules de charbon qui sont dispersées dans l'eau peuvent être considérées comme plus grosses que la matière en suspension ordinaire. Le charbon peut être injecté soit juste avant la filtration, soit durant la floculation [14].

a.1.2. La silice activée : Le principal agent floculant d'origine minérale employé dans le domaine du traitement des eaux est la silice activée. Ce composé offre de bons rendements lorsqu'il est associé au sulfate d'aluminium en eau froide. Un inconvénient accompagne l'utilisation de la silice, elle doit être préparée juste avant son utilisation (faible stabilité) [60].

a.2. Les floculants organiques : Les floculants organiques sont hydrosolubles et peuvent avoir une charge anionique, cationique ou neutre. On peut citer comme exemple l'amidon, les alginates ou les polysaccharides.

a.3. Les floculants de synthèse : Sont des produits fabriqués à partir de monomères à très haute masse moléculaire (entre 10⁵ et 10⁷). Ces polymères ont un rendement supérieur aux polymères naturels. Ils sont classés suivant leur ionicité: anionique, neutre(ou non ionique), cationique [106].

III.5. La décantation :

Ces procédés sont des méthodes de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après l'étape de coagulation-floculation. Si la densité de ces floccs est supérieure à celle de l'eau, il y a décantation [101].

Ces particules s'accumulent au fond du bassin, d'où on les extrait périodiquement. L'eau récoltée en surface est dite clarifiée [107].

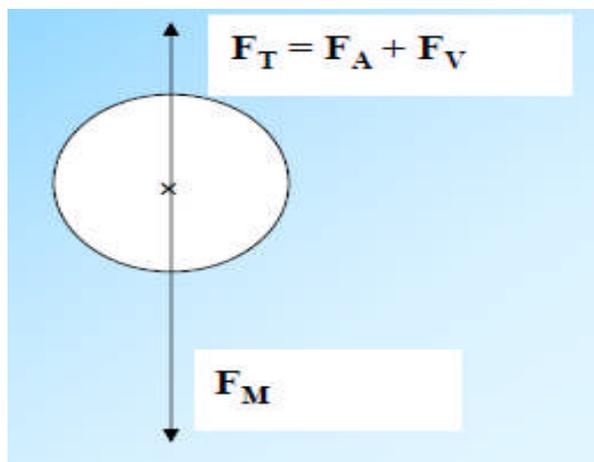
Cette décantation peut cependant être relativement lente pour les très fines particules et les liquides particulièrement visqueux (tableau III.3) [108].

Tableau III.3: Le temps mis par ces particules pour chuter naturellement d'un mètre dans l'eau [26].

Type	Diamètre des particules (µm)	Le temps de décantation
Gravier	10000	1s
Sables grossiers	1000	10s
Sables fins	100	2min
Argile	10	2h
Bactéries	1	8j
Colloïdes	0.1 à 0.001	2 à 200ans

III.5.1. Principe de la décantation :

Dans la décantation, toute particule présente dans l'eau est soumise à deux forces. La force de pesanteur qui est l'élément moteur et qui permet la chute de cette particule. Les forces de frottement dues à la traînée du fluide s'opposent à ce mouvement. La force résultante en est la différence [107].



Si $F_T > F_M$: flottation
 Si $F_T < F_M$: décantation
 Force résultante : $F_R = F_M - (F_A + F_V)$
 Avec :
 F_M : La pesanteur
 F_A : La poussée d'Archimède
 F_v : Les forces de frottement [105].

III.5.2. Types de décantation :

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

III.5.2.1. Décantation de particules grenues (discrètes) :

Les particules conservent leurs propriétés initiales (forme, dimension et densité) au cours de leur chute. La vitesse de chute est alors indépendante de la concentration en solide.

III.5.2.2. Décantation de particules floculantes :

Ce type de décantation est caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leur chute. Les propriétés physiques de ces particules (forme, dimension, densité et vitesse de chute) sont donc modifiées pendant le processus.

III.5.2.3. Décantation freinée :

Ce type de décantation est caractérisé par une concentration élevée de particules, ce qui entraîne la formation d'une couche de particules et par conséquent, l'apparition d'une démarcation nette entre les solides décantés et le liquide surnageant.

III.5.2.4. Décantation en compression de boues :

Les particules entrent en contact les unes avec les autres et reposent sur les couches inférieures [107].

III.5.3. Les type de décanteur :

Les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé "décanteur" pour former les boues. Ces dernières sont récupérées au moyen de systèmes de raclage [26].

Il existe deux types de décanteurs :

III.5.3.1. Décanteur simple :

Le décanteur le plus simple est constitué d'une cuve parallélépipédique munie d'une zone d'entrée et de deux zones de sortie (une pour la sur-verse et l'autre pour les boues). Les décanteurs classiques sont caractérisés par la surface de décantation égale la surface de base [25].

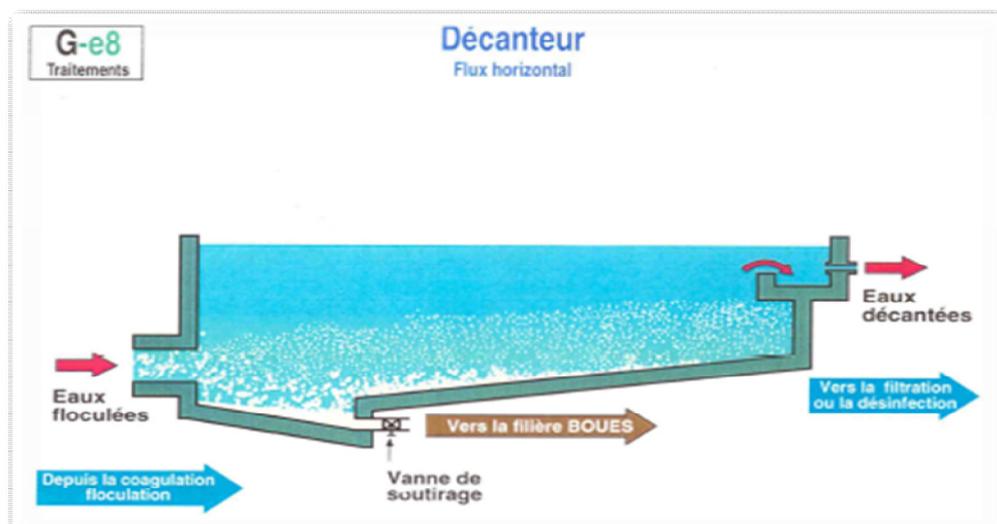


Figure III.7: Décanteur simple [109].

III.5.3.2. Décanteur lamellaire :

Le décanteur lamellaire présente des plaques disposées parallèlement afin d'augmenter la surface de décantation. Les lamelles sont disposées de manière oblique de sorte à permettre le glissement des matières sédimentées vers le fond du décanteur (figure III.8) [12].

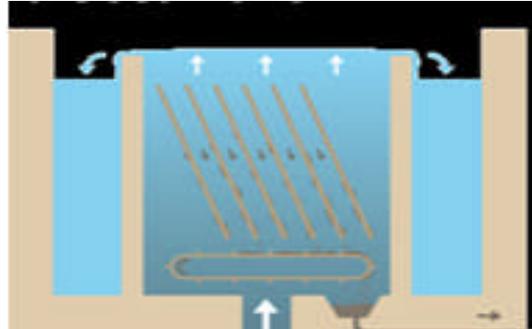


Figure III.8: Décantation [110].

a. Décanteurs à tube :

On trouve deux types de décanteurs à tubes : ceux dont les tubes sont légèrement inclinés par rapport à l'horizontale (7°) et ceux dans les tubes sont fortement inclinés par rapport à l'horizontale (60°) [12].

b. Décanteurs à lamelles :

L'amélioration de la décantation passe par une évacuation du dépôt de boues plus rapidement. Pour cela il suffit que la surface sur laquelle le floc se dépose soit inclinée pour que ce dernier puisse glisser vers le bas au fur et à mesure [12].

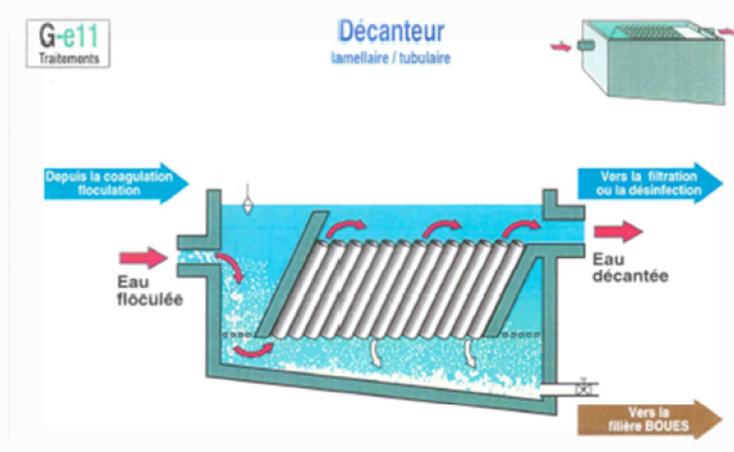


Figure III.9: Décanteur à lamelle [109].

L'utilisation d'un décanteur lamellaire permet d'accroître le rendement de la décantation. Ce type d'ouvrage comporte des lamelles parallèles inclinées, ce qui multiplie la surface de décantation et accélère donc le processus de dépôt des particules. La décantation est encore plus performante lorsqu'elle s'accompagne d'une floculation préalable [26].

Trois types de décantation lamellaire sont possibles [60]:

- ❖ **A contre-courant** : l'eau et la boue circulent en sens inverse (l'eau vers le haut et les boues vers le bas) [60].

- 1 - Entrée de l'eau floculée.
- 2 - Zone de distribution.
- 3 - Récupération de l'eau décantée.
- 4 - Sortie de l'eau décantée.
- 5 - Fosse à boue.
- 6 - Évacuation des boues.

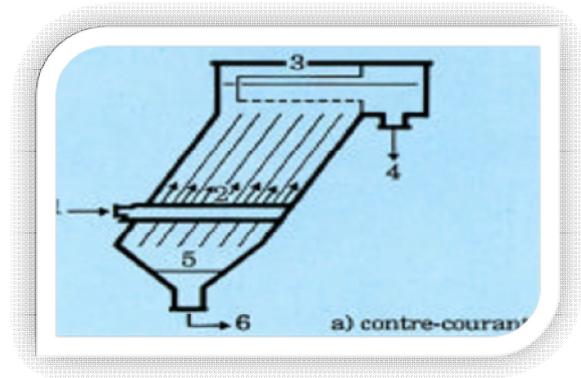


Figure III.10: Décanteur à contre courant [60].

- ❖ **A courant croisés** : L'eau et la boue circulent perpendiculairement l'un par rapport à l'autre (l'eau horizontalement et la boue du haut vers le bas) [60].

- 1 - Entrée de l'eau floculée.
- 4 - Sortie de l'eau décantée.
- 5 - Fosse à boue.
- 6 - Évacuation des boues.

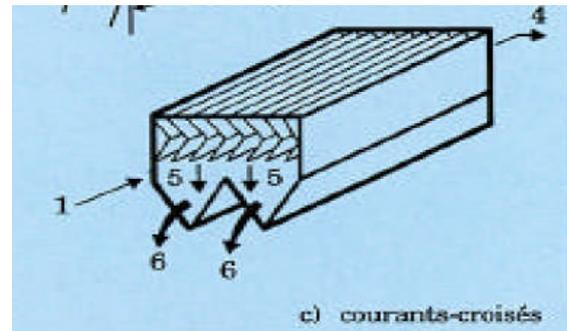


Figure III.11: Décanteur à courant croisés [60].

- ❖ **A cocourant** : L'eau et la boue circulent dans le même sens de haut vers le bas [60].

- 1 - Entrée de l'eau floculée.
- 2 - Zone de distribution.
- 3 - Récupération de l'eau décantée.
- 4 - Sortie de l'eau décantée.
- 5 - Fosse à boue.
- 6 - Évacuation des boues.

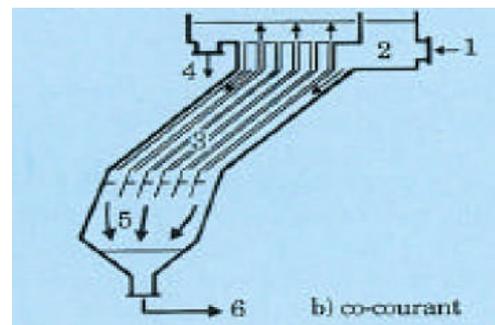


Figure III.12: Décanteur à cocourant [60].

III.5.4. Problèmes liés à la décantation :

- Présence de sable : un dessablage prévu pourra faire éviter l'envasement,
- Variation brutale de la température : elle provoque des dépôts de boues si l'eau n'est pas parfaitement répartie dans le décanteur,
- Abondance d'algues : les bulles gazeuses qu'elles mettent provoquent des remontées des boues [19].

III.5.5. La mise en œuvre de la clarification par coagulation-floculation et décantation :

Selon la turbidité de l'eau brute, sa couleur, sa teneur en MES ou colloïdales et en matières organiques, la clarification des eaux peut être effectuée soit par :

- ✓ La clarification totale,
- ✓ La clarification partielle [111].

III.5.5.1. La clarification totale :

Elle est attribuée aux eaux fortement turbides, de couleur très importante et de teneur en matières en suspension élevée. Elle peut être effectuée par une coagulation totale suivie d'une floculation, décantation et enfin filtration [111].

III.5.5.2. La clarification partielle :

Lorsque l'eau est peu chargée en permanence avec une faible teneur en matières organiques, il est possible d'utiliser pour la traiter, la clarification partielle. Elle peut être effectuée par une coagulation partielle suivie d'une floculation puis directement d'une filtration. La floculation dans ce cas a pour but non pas d'activer la sédimentation mais d'empêcher la pénétration des floes dans le lit filtrant [111].

III.6. Conclusion :

Les méthodes de coagulation et de floculation sont généralement utilisées pour séparer les matières en suspensions ainsi que les matières colloïdales de l'eau. Cette méthode implique des procédés séquentiels physico-chimiques. Dans les procédés de coagulation, en utilisant des coagulants cationiques, les colloïdes chargés négativement dans l'eau sont déstabilisés par neutralisation des forces qui les relient.

On cherche à obtenir au final l'eau la plus limpide et les floes les plus gros et les mieux décantés.

Dans ce chapitre nous avons détaillé, plus particulièrement, ces procédés sur lesquels porte spécifiquement notre étude et on a essayé de présenter les principaux paramètres qui affectent le processus de coagulation- floculation.

Partie B:

Partie expérimentale

Chapitre I

Description des bancs d'essais et les appareillages de mesure

CHAPITRE I :

**DESCRIPTION DES BANCS D'ESSAIS ET LES
APPAREILLAGES DE MESURE****I.1. Coagulation-floculation et décantation :****I.1.1. Introduction :**

Puisque la coagulation floculation prend sa place pratiquement dans toutes les stations de traitement ou d'épuration des eaux, on procède dans ce travail de montrer la mise en œuvre et le fonctionnement de cette étape de traitement à l'aide de l'étude expérimentale de la coagulation floculation [83] et nous prendrons en considération la décantation classique par rapport à celle lamellaire (Co-courant et Contre-courant) [27].

L'étude expérimentale de la coagulation-floculation a pour but de déterminer les concentrations optimales nécessaire à une réduction maximale de la turbidité d'une eau salée et turbide.

Afin de satisfaire cet objectif, on a choisi le jar-Test comme technique expérimental.

Le contrôle du degré de clarification de l'eau a été fait à l'aide d'un turbidimètre, afin de nous permettre le suivi du processus de clarification de l'eau [84].

I.1.2. Description des bancs d'essai :**I.1.2.1. Description du pilote TE600 :****a. Construction :**

L'appareil consiste essentiellement en un décanteur statique, montée sur un châssis, ainsi que ses organes de stockage de contrôle et de mesure.

1 : Cuve d'alimentation de la suspension, en PVC transparent, cylindrique, capacité utile 300 litre, avec vanne de vidange et vanne d'alimentation de type à boisseau sphérique.

2 : Canalisation d'alimentation de la suspension en PVC avec vanne de réglage à pointeau en laiton chromé.

3 : Cuve d'alimentation du coagulant, capacité utile 30 litre, avec vanne de vidange de type à boisseau sphérique en PVC.

4 : Cuve d'alimentation du floculant, capacité utile 1 litre, avec vanne de vidange de type à boisseau sphérique en PVC.

5 : Réacteur de mélange de la suspension et des réactifs chimiques, de type cylindro-conique en verre boro-silicaté, capacité utile 20 litre, avec vanne de vidange de type à boisseau sphérique en PVC.

6 : Agitateur du réacteur.

7 : Surverse de prélèvement de la suspension sortant de réacteur en PVC, réglable en hauteur.

8 : Décanteur statique de section rectangulaire avec cône de récupération des boues décantées en altuglas :

- ✓ Vanne d'alimentation de type trois voies en « L » à boisseau sphérique en PVC ;
- ✓ Chicane de passage du liquide clarifié ;
- ✓ Evacuation du liquide clarifié supérieure ;
- ✓ Chicane amovible d'évacuation du liquide clarifié pour fonctionnement à Contre-courant ;
- ✓ Chicane amovible d'évacuation du liquide clarifié pour fonctionnement à Co-courant ;
- ✓ Vanne de vidange des boues du décanteur de type à boisseau sphérique en PVC.

9 : Lamelles de décantation, amovibles, pour fonctionnement à Contre-courant et Co-courant, en altuglas, à démontage et inversion rapides (inclinaison des lamelles 30°);

10 : Canalisation de recyclage éventuel des boues du décanteur vers le réacteur avec vanne d'arrêts de type à boisseau sphérique en PVC et vanne de réglage à pointe en laiton chromé.

11: Charpente de supportage en tube carrés en acier inoxydable [87].

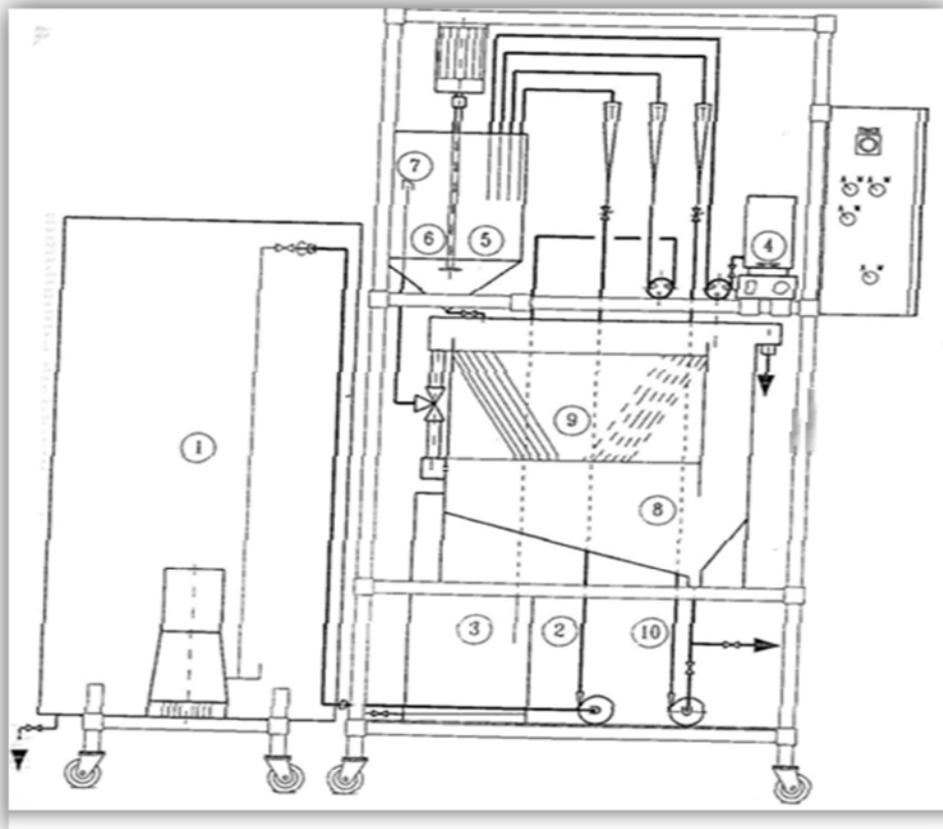


Figure I.1 : Construction du pilote TE600 [87].

b. Manipulations :

Le pilote de coagulation floculation-décantation permet d'étudier deux types de traitements : la coagulation-floculation et la décantation. On peut facilement étudier les deux séparément ou bien simultanément.

Le produit est préparé dans le bac d'alimentation (1) sous l'agitation permanente grâce à une pompe centrifuge immergée, puis alimenté à travers un débitmètre et une vanne de réglage (2) dans le réacteur (5) par une pompe centrifuge.

Le coagulant est stocké dans un bac spécifique (3) puis alimenté au réacteur par l'intermédiaire d'une seconde pompe péristaltique.

Le floculant est également stocké dans un bac spécifique (4) puis alimenté au réacteur par l'intermédiaire d'une seconde pompe péristaltique.

Le réacteur est maintenu sous agitation permanente (6) par un agitateur à hélice à vitesse variable. Le produit de la réaction est soutiré par surverse (7) puis alimenté dans le décanteur statique (8) muni de lamelles orientables (9).

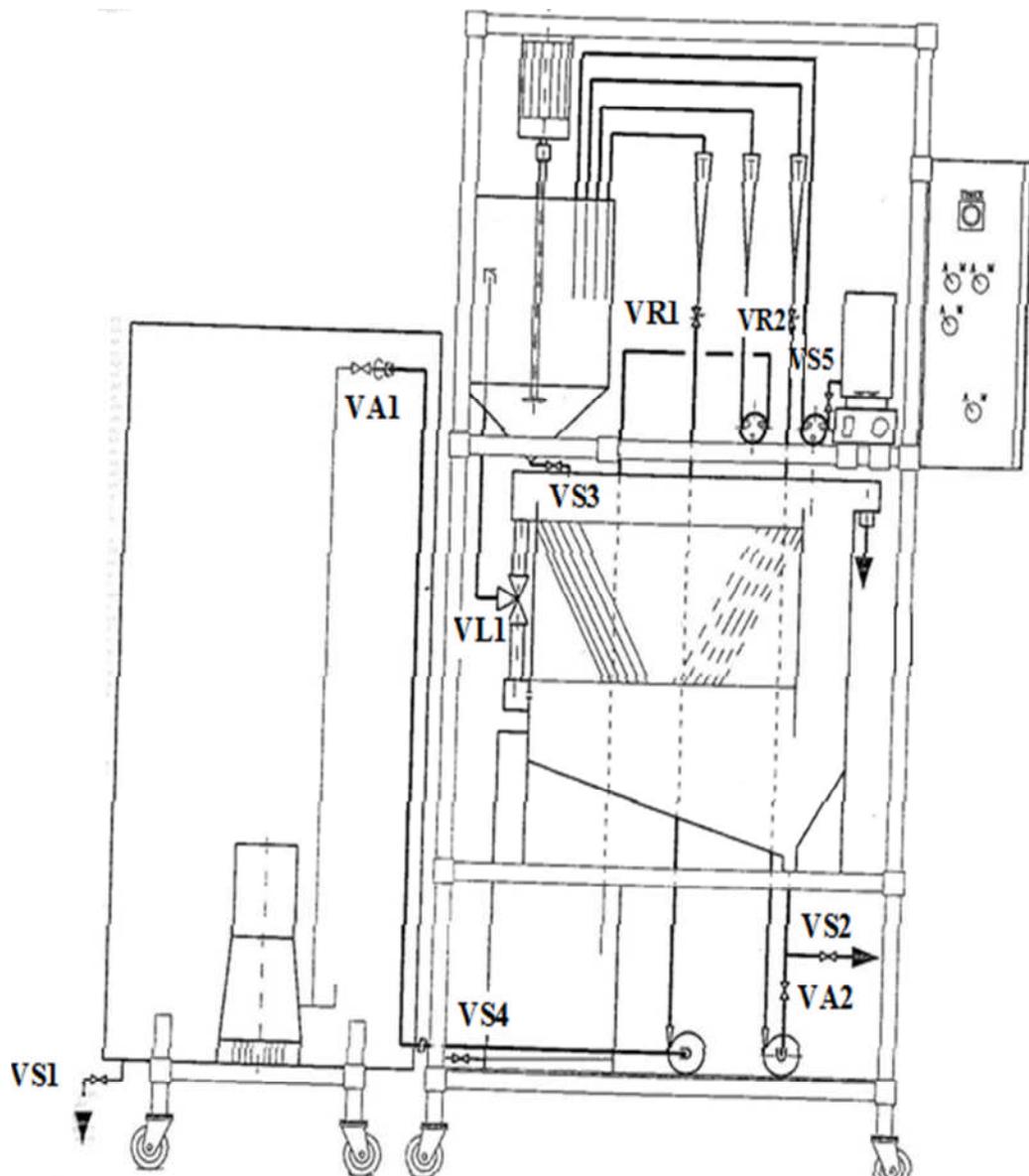
Une partie des produits décantés peuvent être recyclés par l'intermédiaire d'un circuit (10) avec pompe centrifuge, vanne de réglage et débitmètre [87].



Photos N°01: Pilote de coagulation-floculation et décantation (TE 600) (laboratoire du Département d'Hydraulique. Université de Tlemcen).

c. Liste des vannes :

- VA1 : Vanne manuelle bac d'alimentation.
- VA2 : Vanne manuelle recyclage boues.
- VS1 : Vanne manuelle sortie bac d'alimentation.
- VS2 : Vanne manuelle sortie boues.
- VS3 : Vanne manuelle sortie réacteur.
- VS4 : Vanne manuelle sortie bac coagulant.
- VS5: Vanne manuelle sortie bac floculant.
- VR1 : vanne manuelle de réglage alimentation.
- VR2 : Vanne manuelle de réglage recyclage boues.
- VL1 : Vanne trois alimentations décanteur [87].

**Figure I.2: Liste des vannes du pilote TE600 [87].**

I.1.2.2 : Description d'appareil du « Jar- Test » :

Les essais au laboratoire à l'aide d'un Jar-Test restent jusqu'à ce jour la méthode la plus couramment utilisée pour le choix des réactifs et de leurs concentrations [84].

Elle consiste à remplir un bécher contient une suspension témoin (sans addition de coagulant). Les autres contiennent la même suspension mais soumise à des doses croissantes de coagulant (la dose optimal de coagulant) [25].

❖ Le Jar-Test que nous avons utilisé, de marque flocculateur 11197, comporte 4 agitateurs dont la vitesse de rotation peut varier entre 0 et 200 tr/min. Les pales sont de type à hélices (Photos N°2) et le volume des béchers est de 1 litre.



Photos N°02 : Le Jar-Test (floculateur 11197) (laboratoire du Département d'Hydraulique. Université de Tlemcen)

Remarque :

J'ai commencé mon travail au début avec le Jar-Test de marque flocculateur 11197 (laboratoire du Département d'Hydraulique, Université de Tlemcen) mais à cause des problèmes qui touchent le turbidimètre (elle donne des valeurs anormales par exemple pour l'eau claire elle donne des valeurs grandes) j'ai continué mon travail avec le jar-Test de marque ISCO IDH3A000 (laboratoire de Sekkak).

❖ Le Jar-Test que nous avons utilisé, de marque ISCO IDH3A000, comporte 6 agitateurs dont la vitesse de rotation peut varier entre 0 et 300 tr/min. Les pales sont de type à hélices (Photos N°3) et le volume des béchers est de 1 litre.



Photos N°03: Le "jar-Test"(ISCO IDH3A000) (laboratoire de Sekkak).

I.1.3. Analyse des eaux :

Avant d'entamer les essais de coagulation [106] différentes analyses sont effectuées au laboratoire afin de suivre tous les paramètres caractérisant la qualité des eaux (avant et après), ainsi que pour chaque proportion des mélanges d'optimisation [102].

I.1.4. Matériels utilisés :

I.1.4.1. Appareillage de mesure :

Les paramètres à analyser sont : la turbidité, le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité et la température.

Les appareillages consignés dans le tableau (I.1) ont été utilisés au cours de notre travail.

Tableau I.1: Types d'appareillages utilisés pour les différentes analyses

Paramètres mesurés	Types d'appareils
Température	Le thermomètre
pH	pH mètre(PH211)
Turbidité	Le turbidimètre 2100N
Conductivité	Le conductimètre EC215

a. Détermination de la turbidité :

La turbidité est la mesure de l'aspect trouble de l'eau. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes [14].

La turbidité est un paramètre important pour analyser, en laboratoire, la qualité de l'eau traitée, pour les eaux destinées à la consommation, une valeur maximale de turbidité a été repérée à 5 UTN (unité de turbidité néphélométrique) [83].

Tableau I.2: Classe de turbidités usuelles (NTU) [89]

Turbidité <5 NTU	Eau claire
5 < turbidité < 30 NTU	Eau légèrement trouble
Turbidité >50 NTU	Eau trouble

a.1. Principe :

Le principe de la turbidité se base sur la mesure de la dispersion des rayons lumineux par la solution [102].

La turbidité résulte de la diffusion de la lumière qui est ainsi déviée dans toutes les directions. Ce sont des particules en suspension dans l'eau qui diffusent la lumière [14].

a.2. Mode opératoire :

Remplir la cellule avec l'échantillon jusqu'au trait de jauge d'une façon à éviter la formation des bulles d'air. On ferme la cellule. On place la cellule dans le turbidimètre, et on lit la valeur affichée sur l'écran.



Photos N°04 : Turbidimètre.

b. Détermination du potentiel d'hydrogène :

b.1. Principe :

La méthode de mesure par électrode de verre consiste à mesurer la différence de potentiel produite entre l'électrode de verre et l'électrode de référence introduite dans l'eau d'analyse [106].

b.2. Mode opératoire :

Etablir les connexions électriques nécessaires de pH-mètre, on lave l'électrode avec l'eau [102] du robinet, puis eau distillé puis à l'eau analysée, [27] et on verse l'échantillon d'eau dans le bêcher puis y plonger les électrodes et lire la valeur du pH indiquée sur l'écran de l'appareil [102].

Avant chaque mesure l'appareil doit être régulièrement étalonné pour que ces mesures soient justes.



pH-mètre
ADE de Tlemcen



pH-mètre
Laboratoire de Sekkak



pH-mètre
Laboratoire de département d'Hyd

Photos N°05: pH-mètre.

c. Détermination de la conductivité :

c.1. Principe :

Le passage du courant électrique est en fonction directe de la concentration ionique de la solution, sa détermination donne la quantité des sels dissous.

c.2. Mode opératoire :

On suit les mêmes étapes que pour la mesure du pH.



Conductimètre ADE de Tlemcen



Conductimètre Laboratoire de Sekkak

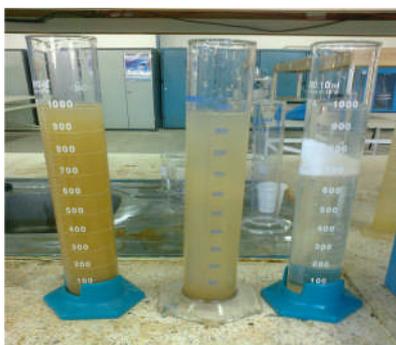
Photos N°06: Conductimètre.

d. Le thermomètre :

La température doit être mesurée in situ. Les appareils de mesure de la conductivité ou de pH possèdent généralement un thermomètre intégré, ou lire l'indication sur l'échelle lorsque la colonne de mercure devient constante.

I.1.4.2. Verreries :

- ✓ Bêchers de 100 ; 500 et 1000 ml ;
- ✓ Pipettes de 5 ; 10 et de 25 ml ;
- ✓ Erlenmeyer ;
- ✓ Fioles jaugés de 500 et 1000 ml ;
- ✓ Entonnoir ;
- ✓ éprouvettes de 500 et 1000ml

I.1.4.3. Autres : comme la pissette et le balance électronique ;**Photos N°07: Les éprouvettes****Photos N°08: Les bêchers****Photos N°09 : Erlenmeyer****Photos N°10 : Fioles jaugés****Photos N°11: Balance électronique**

I.2. Ultrafiltration :

I.2.1. Description du pilote TE 300 :

I.2.1.1. Objectif pédagogique :

Ce pilote peut être défini, au même titre que l'osmose inverse, comme un procédé de séparation en phase liquide par perméation à travers une membrane permselective.

Le diamètre des pores de ces membranes microporeuses sont de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} m ; ceux-ci permettent de laisser passer des molécules de petites tailles (eau, sel) et de retenir des molécules de taille beaucoup plus élevées (polymères, protéines, colloïdes) [112].

I.2.1.2. Construction :

L'appareil consiste essentiellement en une cartouche contenant la membrane filtrante, montée sur un panneau lui-même supporté par une charpente, ainsi que ses organes de stockage de contrôle et de mesure.

- 1: Cuve d'alimentation de la solution, en PVC transparent, cylindrique, capacité utile 60l, avec vanne de vidange de type à boisseau sphérique en PVC et joint d'étanchéité en PTFE.
- 2 : Pompe centrifuge d'alimentation de type multi étagée; corps et aubages en acier inoxydable 316; débit 1700l/h à 3,5 bar; moteur électrique monophasé, 220 V, 50 Hz.
- 3 : Canalisation d'alimentation de la solution dans la cartouche d'ultrafiltration en PVC, DN 10, PN 16 avec vanne de « by-pass » à boisseau sphérique en PVC et joint d'étanchéité en PTFE, DN 15 et soupape de sécurité en laiton chromé tarée à 6 bar sur la canalisation de recyclage vers la cuve d'alimentation.
- 4 : Cartouche d'ultrafiltration, de type linéaire; corps en poly sulfone; membrane en poly acrylonitrile; surface de filtration $0,6 \text{ m}^2$; pression maximum d'alimentation 5 bar; débit de perméat 90 l/h; pression maximum dans le perméat 3 bar; pression maximum transmembranaire 3 bar; diamètre 60 mm, longueur 550 mm.
- 5: Canalisation de sortie du perméat de la cartouche d'ultrafiltration en PVC, DN 10, PN 16 avec vanne de vidange à boisseau sphérique en PVC et joint d'étanchéité en PTFE, DN 15 et vanne de réglage à pointeau en laiton chromé, 1/2".
- 6: Cuve de réception du perméat, en PVC transparent, cylindrique, capacité utile 40 litre, avec vanne de vidange de type trois voies (prélèvement ou recyclage) à boisseau sphérique en PVC et joint d'étanchéité en PTFE, DN 15 et vanne de soutirage à boisseau sphérique en PVC et joint d'étanchéité en PTFE, DN 15.
- 7: Canalisation de sortie du concentrât de la cartouche d'ultrafiltration en PVC, DN 10, PN 16 avec vanne de vidange à boisseau sphérique en PVC et joint d'étanchéité en PTFE, DN 15.

-8 : Echangeur de chaleur sur le circuit du concentrât, de type LIEBIG (mono tubulaire), en acier inoxydable 316, surface totale d'échange $0,03 \text{ m}^2$ et vanne de réglage à pointe en laiton chromé, 1/2".

-9 : Cuve de réception du concentra, en PVC transparent, cylindrique, capacité utile 60 litre, avec vanne de vidange de type a boisseau sphérique en PVC et joint d'étanchéité en PTFE, DN32 [112].

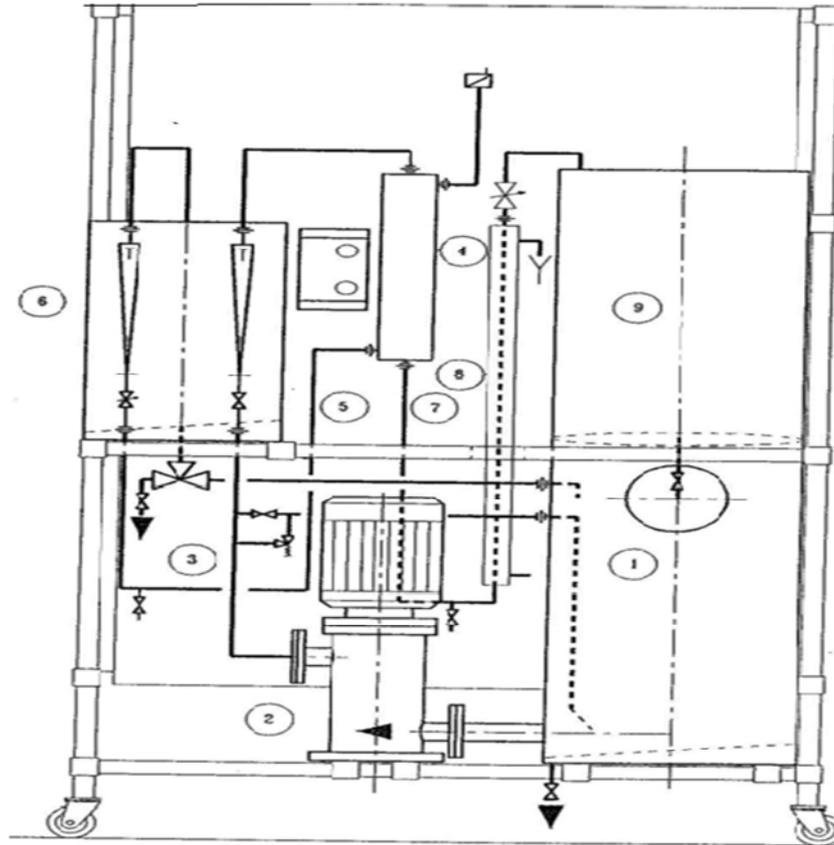


Figure I.3: Construction du pilote TE300 [112].

I.2.1.3. Instrumentation :

-A- Débitmètre à flotteur du circuit de sortie du perméat, en PVC transparent, DN 15; précision +/- 5 %.

-B- Débitmètre à flotteur du circuit d'alimentation de la solution, en PVC transparent, DN20 ; échelle 300-3000 L/h; précision +/- 5 %.

-C- Manomètres de mesure de la pression d'alimentation, de la pression du perméat et de pression du concentrât, de type à tube de « BOURDON »; cadre et tube de mesure en acier inoxydable 304 L.

-D : Détecteur de niveau de sécurité de la cuve d'alimentation, de type à flotteur magnétique en plastique.

-E- Arrêt / Marche de la pompe d'alimentation avec protection thermique [112].

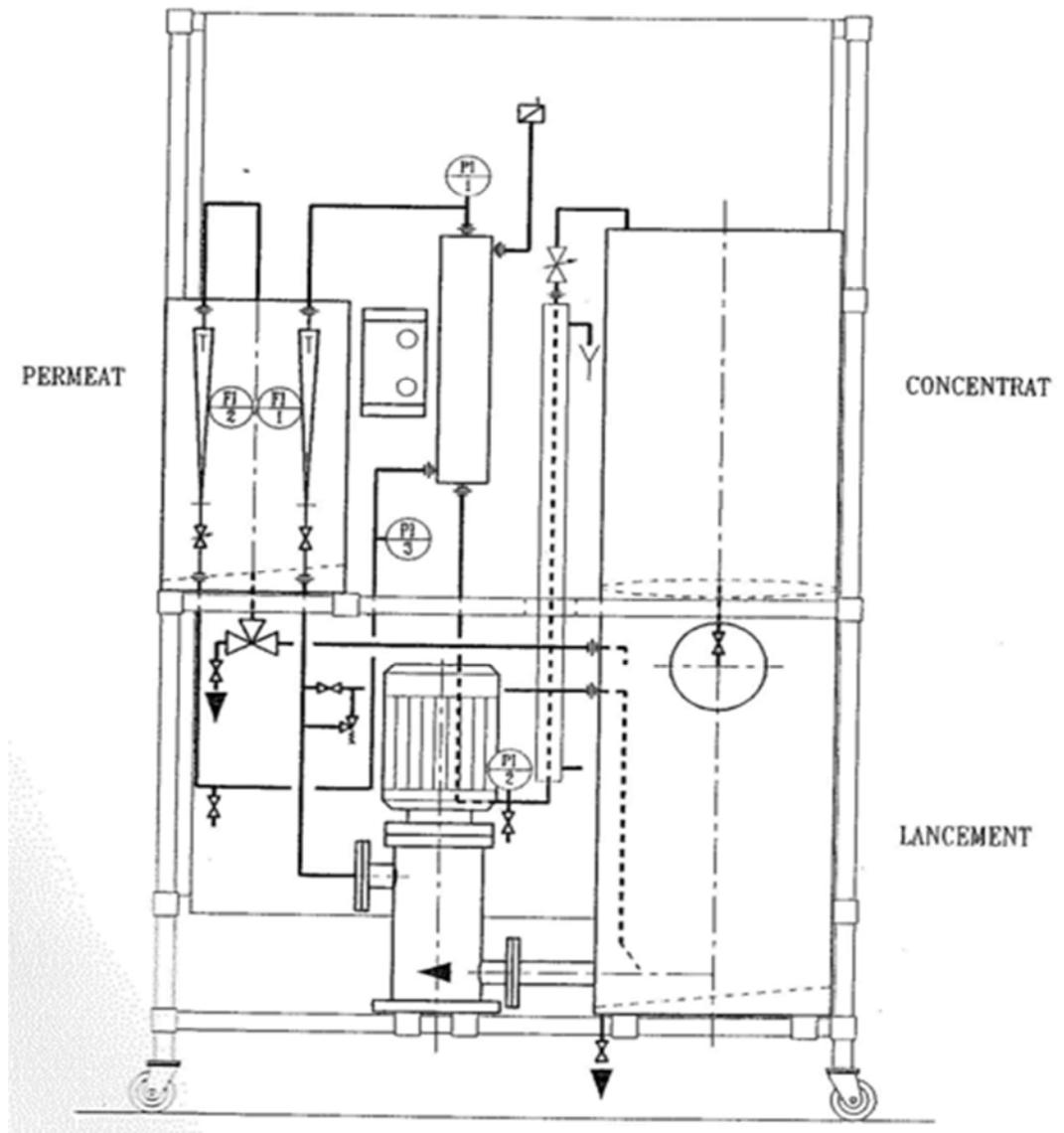


Figure I.4: Instrumentation du pilote TE300 [112].

I.2.1.4 : Liste des vannes :

- VR1 : Vanne manuelle de réglage circuit alimentation solution.
- VR2 : Vanne manuelle de réglage circuit sortie perméat.
- VR3 : Vanne manuelle de réglage circuit sortie concentrât.
- VA1 : Vanne manuelle d'arrêt recyclage alimentation.
- VA2 : Vanne manuelle trois voies sortie cuve perméat.
- VS1 : Vanne manuelle vidange cuve alimentation.
- VS2 : Vanne manuelle vidange cuve perméat.
- VS3 : Vanne manuelle vidange circuit perméat.
- VS4 : Vanne manuelle vidange circuit concentrât.
- VS5 : Vanne manuelle vidange cuve concentrât [112].

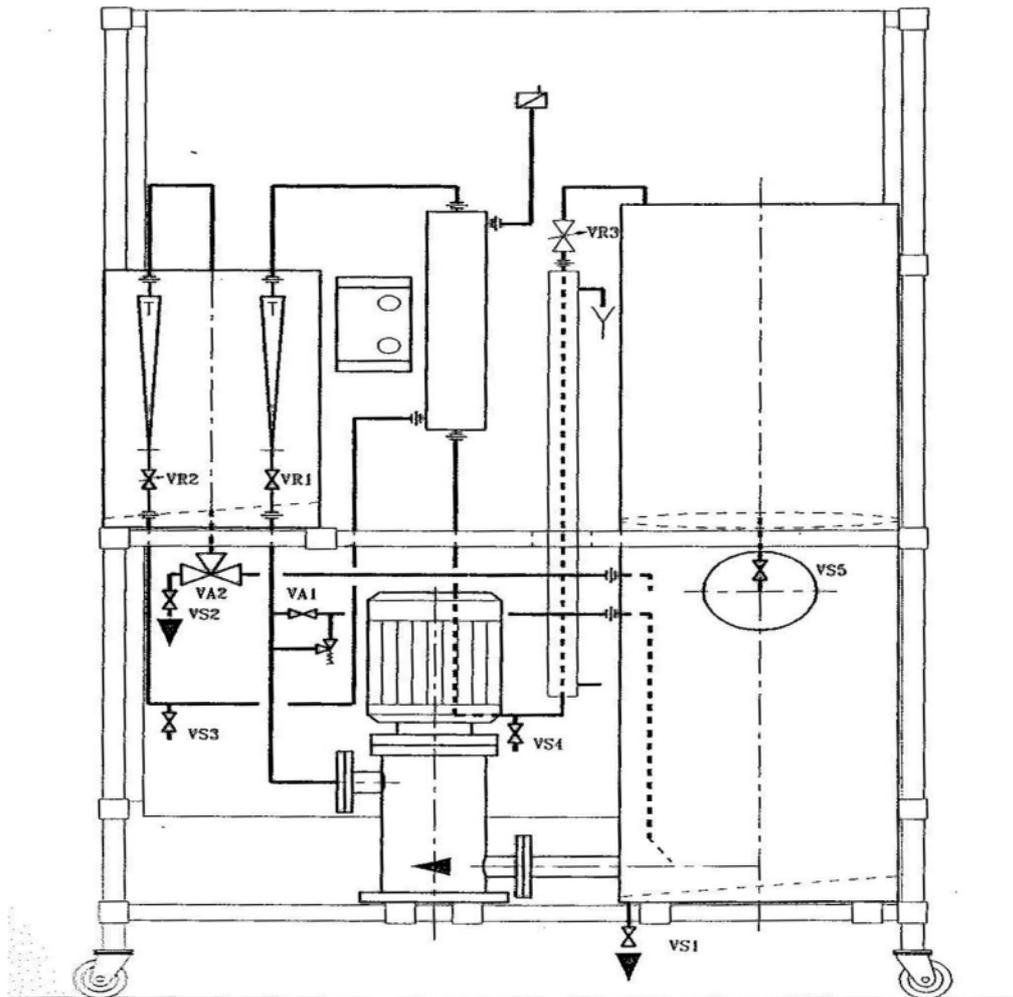


Figure I.5 : Liste des vannes du pilote TE300 [112].

I.2.2 : Manipulation :

I.2.2.1 : Objectif :

L'utilisation du pilote doit montrer le fonctionnement d'un module d'ultrafiltration.

Les expérimentations vérifieront la performance de la membrane pour divers débits et diverses pressions.

Etude du procédé d'ultrafiltration pour une solution de forte concentration de NaCl.

Evolution du taux de conversion de la membrane.

- La première partie consiste à montrer la variation de débit du perméat en fonction de la pression pour un débit d'alimentation donné.
- La seconde partie montre une nouvelle application pour l'ultrafiltration: prétraitement au dessalement de l'eau de mer (eau préparée).
- Nous pourrions constater les différentes qualités des eaux produites en fonction des débits et des pressions.

I.2.2.2 : Préliminaires :

Le passage d'eau et de soluté à travers la membrane entraîne un dégagement de chaleur.

Ce dégagement de chaleur est transmis à la solution (perméat et concentrât) et au module. La température du bac d'alimentation augmente jusqu'à parvenir à une température de stabilisation qui est de l'ordre de 30 °C (en 1h30 - 2h environ).

Pour obtenir des mesures reproductibles, il faut que le pilote soit à température stable car les performances de la membrane varient en fonction de celle-ci.

Pour atteindre cet équilibre il suffit de positionner les vannes de l'installation de façon à recycler le concentrât. Il convient également de refroidir le concentrât recyclé en alimentant d'eau froide l'échangeur de chaleur du circuit concentrât [112].

I.2.2.3 : Principe :

On filtre sous pression d'air un liquide à travers une membrane avec des pores tellement petits que les macromolécules ne peuvent les traverser [113].

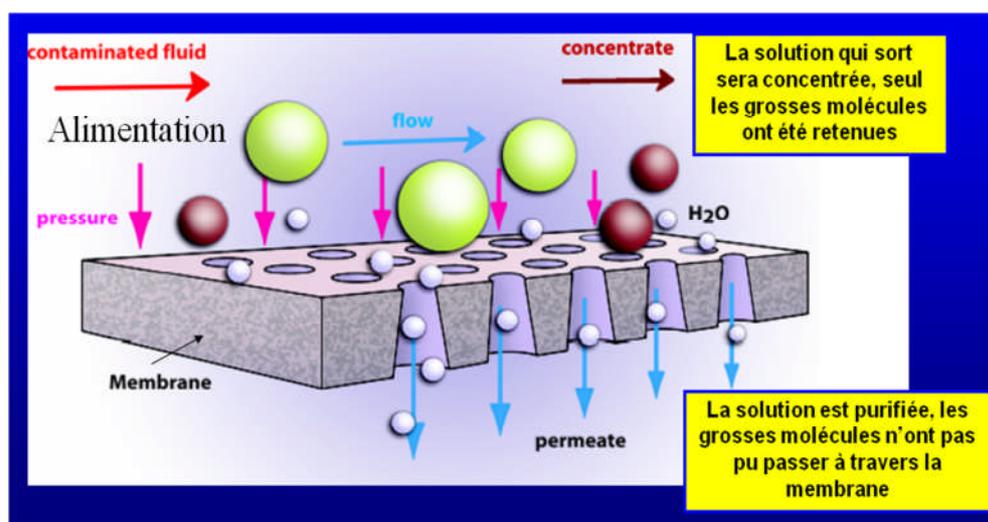


Figure I.6: Schéma de principe de l'UF [113].

La solution préparée est introduite dans la réserve (1). La solution est alimentée dans le cartouche (4) à travers la pompe (2) et la canalisation (3) qui permet de régler le débit et la pression d'admission par l'intermédiaire de la vanne de réglage du « by-pass » (recyclage vers la réserve d'alimentation) et la vanne de réglage de débit, le débit d'alimentation est lu sur le rota mètre associé.

Le perméat est récupéré par la canalisation (5), la pression du perméat est réglée avec la vanne de réglage de cette canalisation et le débit est déterminé par le rota mètre associé, le perméat est ensuite stocké dans la réserve (6).

Le concentrât passe dans la canalisation(7) avant d'être refroidi par l'échangeur de chaleur prévu à cet effet (8), la vanne de réglage de la canalisation permet de régler le débit et la pression du concentrât.

Le concentrât est stocké dans la réserve (9) ou recyclé à travers la vanne de vidange de cette réserve vers la cuve d'alimentation (1) [112].



Photos N°12: Pilote d'Ultrafiltration (TE 300) (Laboratoire du Département d'Hydraulique. Université de Tlemcen).

Chapitre II

*Mode d'opérateur
expérimental*

CHAPITRE II

MODE D'OPERATOIRE EXPERIMENTAL**II.1. Etude expérimentale de la CFD:****II.1.1. Les objectifs du travail :**

Les objectifs convenables de ce travail sont :

- ✓ L'étude de l'influence de la concentration du coagulant et floculant sur le rendement de l'élimination de la matière en suspension;
- ✓ L'étude de l'influence de la turbidité de l'eau salée sur la coagulation floculation;
- ✓ L'étude de l'influence de la vitesse et de la durée d'agitation sur la coagulation floculation.
- ✓ L'étude de l'influence de la décantation classique par rapport à celle lamellaire Co-courant et Contre-courant.

Pour réaliser ces objectifs, il faut suivre les étapes suivantes :

- ❖ Pour la phase de coagulation floculation :
 - Trouver la dose optimale du coagulant et/ ou floculant en fonction de la nature de l'eau à traiter ;
 - Optimisation de la vitesse et le temps d'agitation.
- ❖ Pour la phase de décantation :
 - Il s'agit d'étudier l'efficacité du décanteur classique par rapport à celle lamellaire Co-courant et contre-courant.

II.1.2. Manipulation :

Les essais ont été réalisés au laboratoire de traitement et d'épuration des eaux du département d'Hydraulique à l'Université de Tlemcen et laboratoire de traitement des eaux de Sekkak.

Avant d'entamer les essais de coagulation floculation sur un exemple d'eau salée et turbide (solution préparés par la dissolution de sel mélangé avec B.C.I et l'eau de robinet), nous avons jugé utile d'effectuer au préalable une analyse physico-chimique.

Les paramètres à analyser sont : la turbidité, le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité et la température.

Afin de choisir les meilleurs doses du coagulant et du floculant, nous avons fait l'étude de l'influence de la vitesse et le temps d'agitation sur la coagulation floculation en utilisant le Jar-test et l'étude de la décantation sur le pilote TE 600.

II.1.3. Mode opératoire d'essai en Jar-Test :

Les bases théoriques de la coagulation floculation ne permettent jamais de préciser les doses optimales du coagulant et de floculant, ainsi la vitesse d'agitation d'une eau donnée. Mais, il faut toujours recourir à l'expérience des essais en laboratoire dite du Jar-Test [83].

II.1.3. 1. Mode opératoire de l'influence de la concentration de coagulant :

Les instructions qu'on doit exécuter lors de l'étude de l'influence de concentration de sulfate d'alumine sur la coagulation-floculation de l'eau salée turbide sont les suivantes :

- Bien laver les béchers ;
- Préparer des solutions salées de concentration 38g/l (eau de robinet + sel), mélangé pour obtenir une solution homogène;
- Peser des différentes concentrations de B.C.I (0.1 ; 0.5 ; 1 ; 2 et 3 g/l) ;
- Mesurer un volume précis d'eau à traiter pour chaque bécher (500 ou 1000 ml) selon la capacité des béchers utilisés.
- Mélanger les avec l'eau à traiter pour obtenir des solutions qui portent la même valeur de salinité et de turbidité ;
- Placer les béchers dans le " Jar-Test " agité à une vitesse de 295tr/min pendant 1 min et mesurer les principaux paramètres.
- Mettre en route les agitateurs à une vitesse rapide égale à 200 tr/min ;
- Ajouter des doses croissantes de coagulant (sulfate d'alumine) le plus rapidement possible et de façon identique dans chaque bécher à l'aide des pipettes et laisser l'agitation rapide pendant 2 min ;
- Réduire la vitesse d'agitation jusqu'à 30 tr/min et laisser l'agitation lente pendant 15 min puis la décantation pendant 20 min ;
- puis on prélève 50 ml du surnageant à l'aide d'une pipette placée à une profondeur constante dans chaque bécher.
- mesurer pour chaque échantillon : la température de l'eau claire, son pH, sa turbidité et la conductivité.
- Enregistrer et comparer les résultats obtenus.

II.1.3. 2. Mode opératoire de l'influence de la concentration de floculant:

Une fois les paramètres mesurés et on trouve la dose optimale de coagulant ; c'est bon de déterminer la dose optimale de floculant.

Les étapes à suivre lors de l'étude de l'influence de concentration de polyamide sur la coagulation-floculation d'une eau salée turbide sont les suivantes :

- Remplir les béciers par les mêmes solutions dans l'étude de l'influence de concentration de coagulant,
- Placer les béciers dans le " Jar-Test " agité à une vitesse de 295tr/min pendant 1 min.
- Mettre en route les agitateurs avec une vitesse rapide égale à 200 tr/min ;
- Ajouter la dose optimale de coagulant dans chaque bécier et laisser l'agitation rapide pendant 2 min ;
- Réduire la vitesse d'agitation jusqu'à 30 tr/min ;
- Ajouter les dose croissantes de floculant;
- Laisser l'agitation lente pendant 15 min puis la décantation pendant 20 min ;
- Prélever à partir de chaque bécier 50 ml d'eau décantée, mesurer les paramètres suivants : la température, le pH, la turbidité et la conductivité.
- Enregistrer et comparer les résultats obtenus.

II.1.3. 3. Mode opératoire de l'influence de la vitesse et de la durée d'agitation:

a. Mode opératoire de l'influence de la vitesse et de la durée d'agitation durant la coagulation :

- Bien laver les béciers ;
- Préparer des solutions salées de concentration 38g/l (eau de robinet + sel), mélangé pour obtenir une solution homogène;
- Fixer la concentration de la B.C.I à 1g/l ;
- Mesurer un volume précis d'eau à traiter pour chaque bécier (500 ou 1000 ml) selon la capacité des béciers utilisés.
- Mélanger l'eau et la B.C.I pour obtenir des solutions qui portent la même valeur de salinité et de turbidité.
- Placer les béciers dans le " Jar-Test " agité à une vitesse de 295tr/min pendant 1 min.
- Ajouter la dose optimale du coagulant obtenue lors de l'essai de l'influence des concentrations du coagulant ;
- On varie à chaque fois la vitesse d'agitation rapide (120 ; 150 ; 180 et 200) tr/min ;
- Augmenter le temps d'agitation d'une façon croissante (1 min ; 2 min ; 3min et 4 min) ;
- Réduire la vitesse d'agitation jusqu'à 30 tr/min (la vitesse durant la floculation est maintenue constante);
- Ajouter les doses optimales de floculant obtenue lors de l'essai de l'influence des concentrations du floculant;

- Laisser l'agitation lente pendant 15 min puis la décantation pendant 20 min (La durée d'agitation durant la floculation est maintenue constante);
- Prélever à partir de chaque béccher 50 ml d'eau décantée, mesurer les paramètres suivants : la turbidité, le pH, la conductivité et la température.

Une fois que les conditions optimales de la phase rapide sont fixées, on a effectué les mêmes opérations avec la phase lente pour optimiser la durée et la vitesse.

b. Mode opératoire de l'influence de la vitesse et de la durée d'agitation durant la floculation :

Une fois ces paramètres mesurés on peut identifier la vitesse et le temps d'agitation optimale de la phase lente (la floculation).

- Remplir les bécchers par les mêmes solutions dans l'étude de l'influence de la vitesse et durée d'agitation durant la coagulation ;
- Placer les bécchers dans le " Jar-Test " agité à une vitesse de 295tr/min pendant 1 min ;
- Ajouter la dose optimale du coagulant obtenue lors de l'essai de l'influence des concentrations du coagulant avec une vitesse et un temps qui sont maintenue fixées ;
- Fixer l'agitateur mécanique à une vitesse correspondante de 20 ; 30 ; 45 et 60 tr/min ;
- Ajouter les doses optimales de floculant obtenue lors de l'essai de l'influence des concentrations du floculant;
- varier le temps d'agitation lente (10 ; 15 ; 17 et 20 min) ;
- Prélever à partir de chaque béccher 50 ml d'eau après une décantation de 20min ;
- Mesurer les paramètres suivants : la turbidité, le pH, la conductivité et la température.

II.1.3. 4. Mode opératoire de l'influence de la turbidité de l'eau :

Pour étudier l'influence de la turbidité de l'eau sur la coagulation-floculation. Suivre les instructions suivantes :

- Peser des concentrations croissantes de la bentonite (0.1 ; 0.5 ; 1, 2 et 3 g/l) ;
- Mélanger les avec de l'eau salée (38g/l) pour obtenir des solutions qui portent des valeurs de turbidités croissantes ;
- A l'aide d'essai en Jar-Test, trouver la dose optimale de chaque solution par la mesure des différents paramètres physico-chimique.

II.1.3. 5. Etude cinétique : Décantabilité naturelle (sans produits) :

- Placer 1000 ml d'eau à traiter dans un béccher et noter la turbidité après 5, 30, 60 et 90 minutes.

II.1.4. Mode opératoire de la coagulation-floculation et décantation sur le pilote :

L'eau à traiter est maintenue dans le bac d'alimentation de la suspension sous agitation permanente grâce à une pompe centrifuge immergée, puis alimenté à travers un débitmètre et une vanne de réglage VR1 dans le réacteur par une pompe centrifuge.

La solution du sulfate d'alumine est stockée dans un bac spécifique de 30 litres de capacité, puis alimenté au réacteur par l'intermédiaire d'une pompe péristaltique.

Le réacteur est maintenu sous agitation permanente grâce à un agitateur à hélice à vitesse variable.

Le produit de réaction est soutiré par surverse, puis alimenté le décanteur qu'on veut faire soit classique, soit lamellaire Co-courant ou Contre-courant [87].

II.1.4. 1. La coagulation- floculation et décantation lamellaire Co-courant :

Coagulation floculation et décantation avec sulfate d'alumine et le polymère anionique :

Le mode opératoire de la coagulation floculation et décantation lamellaire Co-courant impose les étapes suivantes :

- Nous avons préparé 0.9 litres de la solution de flocculant mère de 0.2g/l puis nous avons dilué au 1/10, afin d'avoir nos 9 litres de 0.02g/l de concentration nécessaire que nous avons ajouté au fur et à mesure dans le bac d'alimentation du flocculant avec une agitation continue
- Nous avons ensuite préparé 3 litres de solution mère de sulfate d'alumine de 5.2 g/l de concentration et nous l'avons introduit puis dilué au 1/10 dans le bac d'alimentation du coagulant afin d'avoir une concentration de d'alumine de 0.52 g/l.
 - Nous avons réglé le débit d'alimentation de la suspension à un débit fixe de 80 l/h ; puis 60l/h et en fin 40 l/h.
 - Nous avons réglé le débit d'alimentation du coagulant à un débit fixe de 10 l/h ; 7.5l/h ; et en fin 5 l/h.
- Positionner les lamelles de telle manière que leur tige support supérieur soit introduite dans les rainures inférieures latérales des décanteurs vers la droite ;
- Nous avons positionné la vanne de distribution de décanteur VL1 de manière à alimenter celui-ci par le haut.
- Nous avons positionné la plaque verticale de fermeture du circuit hydraulique dans le décanteur de manière à éviter le passage direct d'eau brute coagulée vers la surverse d'eau clarifiée.

- prenez un échantillon d'une eau à traiter contenant dans le bac d'alimentation de suspension.

Pour la 3^{ème} manipulation qu'elle a durée 6h dont les résultats sont les plus important c'est-à-dire avec un débit d'alimentation de 40 l/h. Lorsque le décanteur est plein et après deux heures et quarante minutes, nous avons pris des échantillons d'eau clarifiée tous les 5mn et après 30mn chaque heure.

- Nous avons noté ensuite les paramètres suivants: la turbidité, le pH, la température et la conductivité [87].

Remarque :

Ces essais sont réalisées pour les différents débits (40 ; 60 et 80l/h).

II.1.4. 2. La coagulation- floculation et décantation lamellaire Contre-courant :

Le mode opératoire de la coagulation floculation et décantation lamellaire Co-courant sauf la partie reliée du bassin de décantation qui est comme suite :

- Positionner les lamelles de telle manière que leur tige support supérieur soit introduite dans les rainures du décanteur vers la droite et leur base inférieure reposant sur les supports inférieurs latéraux du décanteur vers la gauche ;

- Positionner la vanne de distribution du décanteur VL1 de manière à alimenter celui-ci du bas ;

- Positionner la plaque horizontale de fermeture du circuit hydraulique dans le décanteur de manière à éviter le passage direct d'eau coagulée vers la surverse d'eau clarifiée sans passer par les lamelles [87];

- prenez un échantillon d'une eau à traiter contenant dans le bac d'alimentation de suspension.

- Lorsque le décanteur est plein et après deux heures et quarante minutes, nous avons pris des échantillons d'eau clarifiée tous les 5mn et après 30mn chaque heure.

- noter les paramètres suivants : la turbidité, le pH, la température et la conductivité

II.1.4. 3. La coagulation- floculation et décantation classique:

Le mode opératoire de la coagulation floculation et décantation classique est le même que celle lamellaire, sauf la partie reliée du bassin de décantation qui impose l'enlèvement total des lamelles [87].

- prenez un échantillon d'une eau à traiter contenant dans le bac d'alimentation de suspension.

- Lorsque le décanteur est plein et après deux heures et quarante minutes, nous avons pris des échantillons d'eau clarifiée tous les 5mn et après 30mn chaque heure.

- noter les paramètres suivants : la turbidité, le pH, la température et la conductivité.

II.1.5. Les réactifs utilisés :

II.1.5.1. Le réactif coagulant :

Au cours de nos essais, nous avons utilisé comme réactif coagulant le sulfate d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3$), préparé par dissolution dans l'eau. Une solution mère de 5.2 g/l est préparée dans le cas du pilote. Dans le cas du jar-teste nous avons travaillé avec une concentration mère de 5 g/l.

Le sulfate d'alumine que nous avons utilisé lors de cette étude est un produit fabriqué par :

KEMIRA (compagnie espagnole livré en sac de 25 Kg) dont la fiche technique est la suivante :

$Al_2(SO_4)$	17%
Al_2O_3 %.....	9.0+2.0
Al_2O_3 libre.....	0.3+0.2
Densité apparente (25°C, g/cm ³).....	0.9+0.2
pH solution.....	3.5+0.5
Formule chimique.....	$Al_2(SO_4)_3, 18H_2O$
Concentration.....	666g/l [88].

II.1.5.2. Le réactif flocculant :

Le polyamide : Nous avons utilisé dans notre travail un flocculant sous forme d'un polymère anionique que la station du barrage «SEKKAK» l'utilise comme un aide coagulant.

II.1.5.3. La bentonite :

L'argile est un excellent adsorbant, dont les propriétés de rétention sont bien connues en agriculture. Elle fixe à la surface de ses microcristaux.

Les roches argileuses sont formées de mélange de minéraux argileux auxquels viennent s'ajouter des minéraux tels que les feldspaths, du quartz, du mica,... Du point de vue chimique, les argiles sont des silicates d'aluminium contenant entre autres des cations alcalins, alcalino-terreux et du fer.

Dans le domaine des eaux potables, la bentonite est utilisée essentiellement comme adjuvant de floculation dans le but de recharger artificiellement une eau contenant trop peu de matières en suspension, ceci afin d'obtenir une meilleure décantation [14].

Dans notre cas, l'utilisation de bentonite charge industrielle a pour but créer la turbidité d'une eau.

II.1.6.Préparation des solutions :

Remarque :

Au lieu de préparer 1 litre de solution dans un bécher de 1 L nous avons travaillé seulement avec 800 ml pour éviter l'écoulement de nos solution surtout quand la vitesse d'agitation lors de la coagulation est très grande (200tr/mn).

II.1.6.1. Préparation du coagulant (sulfate d'aluminium) :

Le choix de ce coagulant est justifié par sa disponibilité au laboratoire, et son utilisation à grande échelle dans les stations de traitement des eaux, bonne efficacité de coagulation [1].

On pèse 5g du coagulant choisi, que nous introduisons dans une fiole de 1L et on ajoute 250 ml de l'eau ; le mélange est agité à l'aide d'un agitateur magnétique jusqu'à dissolution totale du coagulant, enfin on complète par addition de l'eau jusqu'à un volume total de 1 litre.

a. Calcul de la concentration de coagulant :

On a la relation suivante :

$$Q_{ET} * C_{opti} = Q_{R.C} * C_{coag} \quad (II.1)$$

Avec :

Q_{ET} : le débit d'eau à traiter (débit d'alimentation)= 80l/h

C_{opti} : la concentration optimale du coagulant= 0,065 g/l

$Q_{R.C}$: le débit de la pompe du coagulant=10 l/h

C_{coag} : la concentration du coagulant =0.52g/l elle se calcule de la manière suivante :

$$C_{coag} = (Q_{ET} * C_{opti}) / Q_{R.C}$$

$$C_{coag} = (80 * 0,065) / 10 = 0.52 \text{ g/l} \quad C_{coag} = 0.52 \text{ g/l}$$

b. Calcul de la masse de coagulant :

La masse M_c (g) du sulfate d'alumine nécessaire à verser dans le réacteur est :

$$M_{ci} = Q_{ET} * C_{opti} * t_i \quad (II.2)$$

Avec :

t_i = le temps de faire la $i^{ème}$ manipulation).

$Q_{ET(i)}$ = le débit d'eau à traiter (débit d'alimentation) pour la $i^{ème}$ manipulation

$t_1 = 3h$; $Q_{ET(1)} = 80l/h$

$t_2 = 4h$; $Q_{ET(2)} = 60l/h$

$t_3 = 6h$; $Q_{ET(3)} = 40l/h$

Comme nous constatons ; la quantité d'eau à traité qui est « $Q_{ET(i)} * t_i$ » est toujours égale à 240l dans nos 3 manipulations.

Alors :

$$M_c = 80 * 0,065 * 3$$

$M_c = 15,6g$; est la masse nécessaire du coagulant pour traiter 240 l

c. Calcul de volume de coagulant :

Le volume de solution à préparer (eau+ sulfate d'alumine) est calculé par l'équation suivant :

$$V = (Q_{ET} * C_{opti} * t) / C_{coag} \quad (II.3)$$

$$V = (80 * 0,065 * 3) / 0,52$$

$$V = 30 \text{ litres}$$

Donc, le volume total de la solution de sulfate d'alumine de 0,52 g/l de concentration nécessaire pour faire une manipulation est égale à 30 litres.

II.1.6.2. Préparation du flocculant :

a. Calcul de la masse de flocculant :

Les solutions de floculation sont très visqueuses, elles sont très difficiles à dissoudre puisqu'elles ne sont pas stables. Pour cela, il convient de les préparer à l'avance.

Le flocculant choisi est le polyamide de $0,75 \cdot 10^{-3}$ g/l de concentration. La masse $M(g)$ du flocculant à verser dans le réacteur lors des manipulations est calculée par l'équation suivante :

$$M_f = Q_{ET} * C_{opti} * t \quad (II.4)$$

Avec :

Q_{ET} : le débit d'eau à traiter (débit d'alimentation) = 80 l/h ; 60l/h ; 40l/h

C_{opti} : la concentration optimale du flocculant = $0,75 \cdot 10^{-3}$ g/l

t : le temps de faire une manipulation = 3h ; 4h ; 6h.

Alors :

$$M_f = 80 * 0,75 \cdot 10^{-3} * 3 = 0,18 \text{ g} \quad M_f = 0,18 \text{ g}$$

b. Calcul de volume de flocculant:

Nous avons fait plusieurs teste sur la vitesse de floculation du pilote en prenant une éprouvette de 50 ml d'eau et nous mesurons le temps nécessaire avec les différents vitesses et nous avons trouvé :

- $V_f = 5$ correspond à 2 minutes
- $V_f = 7,5$ correspond à 1,5 minute
- $V_f = 10$ correspond à 1 minute

Et comme nous traitons 240 l ; il nous faut 180 minutes de traitement avec $V_f = 10$; c'est-à-dire il nous faut $180 \cdot 0.05$ soit 9 litres donc une concentration en flocculant de 0.02g/l.

II.1.6.3. Calcul pour le bac d'alimentation :

a. Calcul du volume du bac (V) :

Nous avons fait 3 manipulations sur le pilote en 3 jours avec des débits d'alimentation différents 80l/h ; 60l/h et 40 l/h en un temps de 3 heures, 4 h et 6 heures pour traiter 240 l d'eau. Nous avons jugé utile d'ajouter un peu plus d'eau à traité pour travailler correctement.

Pour cela nous avons préparé 250 l

La concentration de BCI étant = 1g/l ; pour 250 litres il faut versée 250 g de BCI.

La concentration de sel= 38g/l ; pour 250 litres il faut versée 9500 g du sel.

b. Calcul de la hauteur de l'eau à traiter :

$$V=h \cdot S \rightarrow h=V / S \quad (\text{II.5})$$

Avec:

V : le volume du bac (m^3)= 0, 25 m^3

h : la hauteur d'eau (m)

S : la surface totale du bac (m^2)

- On calcule la surface :

Le diamètre du bac= 0,59 m

Le rayon= (0,59/2)= 0,45m

La surface du bac (S) = $\pi \cdot r^2 = \pi \cdot (0,45)^2 = 0,273 \text{m}^2$

Alors : h= (0, 25 /0,273)=0,989 m

h= 91,5cm.

II.2. Etude expérimentale de l'ultrafiltration :

II.2.1. Application de l'ultrafiltration pour une solution salée et turbide ([NaCl]= 38g/l et 1g/l de B.C.I) :

II.2.1.1. But:

Déterminer dans quel sens les paramètres principaux (pression appliqué en amont et taux de conversion) doivent évoluer pour parvenir à obtenir un taux de rejet élever tout en gardant un débit de perméat important.

II.2.1.2. Mode opératoire :

- Préparer une solution salée (à une concentration 38g/l de NaCl) et turbide (1 g/l de B.C.I)
- Pour cette production on utilisera un réservoir d'alimentation (environ 50l) de cette solution préparée.
- En utilisant un thermomètre portable pour lire la température de la solution.
- Mettre en marche le pilote en fixant la pression appliquée à 1.5 bars.
- Réaliser toutes les trois minutes les mesures suivantes : les débits de perméat Q_p et d'alimentation Q_a , les pressions, la turbidité ,la conductivité la température et en fin la pH.
(Pour la même pression faire varier $y=Q_p/Q_a$).

Au cours du temps agir sur les vannes judicieusement pour permettre de respecter la condition de débit.

Faire de même pour différents pressions (2 ; 2.5 ; 3 et 3.5bar).

Pour les résultants obtenues; tracer les courbes concentrations en soluté dans le perméat en fonction du débit d'alimentation pour une pression donnée et $R = f(Y)$ pour différentes pressions.

II.2.1.3. Rinçage du module :

- Vidanger le bac
- Remplir le bac avec environ 50l d'eau de robinet
- Faire fonctionner l'opération pendant 5 minutes pour effectuer le rinçage
- Répéter l'opération jusqu'au l'obtention d'une solution claire.
- Vidanger le réservoir à la fin.

Chapitre III

*Résultats expérimentaux
et interprétation*

CHAPITRE III:

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION**III.1. Etude expérimentale de la coagulation-floculation et décantation :****III.1.1. Introduction:**

L'étude expérimentale de la coagulation-floculation a pour but de déterminer les conditions optimales nécessaires pour une réduction maximale de la turbidité de l'eau à traiter.

III.1.2. Caractéristiques de l'eau utilisée :

L'eau utilisée dans les différents essais est une eau de robinet (eau dessalé provenant de l'usine de dessalement de HONAIN). Le tableau (III.1) regroupe les caractéristiques physico-chimiques de cette eau.

Tableau III.1 : Caractéristiques de l'eau utilisée

Les paramètres	La turbidité	pH	La température	La conductivité
L'eau utilisée	1 NTU	6.97	20 °C	700 µs/cm

III.1.3. Caractéristiques de l'eau à traiter :

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter en laboratoire sont regroupées dans le tableau (III.2).

Tableau III.2: Les caractéristiques physico- chimiques de l'eau à traiter

Les paramètres			
La turbidité	pH	La température	La conductivité
<i>L'eau à traiter</i> ↪ <i>0.1 g/l de B.C.I</i>			
19.5 NTU	7.43	17.6 °C	57000 µs/cm
<i>L'eau à traiter</i> ↪ <i>0.5 g/l de B.C.I</i>			
56.8 NTU	7.74	19.9°C	59100µs/cm
<i>L'eau à traiter</i> ↪ <i>1g/l de B.C.I</i>			
170 NTU	7.85	19.3 °C	576000µs/cm
<i>L'eau à traiter</i> ↪ <i>2 g/l de B.C.I</i>			
351 NTU	7.94	19.7 °C	57900µs/cm
<i>L'eau à traiter</i> ↪ <i>3 g/l de B.C.I</i>			
515 NTU	7.99	18 °C	58400 µs/cm

III.1.3. 1. Effet de B.C.I sur la turbidité et le pH d'une eau salée :**a. Effet de B.C.I sur la turbidité :**

La figure (III.1) illustre la variation de la turbidité en fonction de la concentration de la bentonite(B.C.I). La turbidité augmente linéairement avec la concentration de la bentonite. Le mélange des fines particules de la bentonite à l'eau, induit un détachement de celles-ci, suite à leur forte hydratation. La dispersion de la bentonite à liber des particules colloïdales très fines.

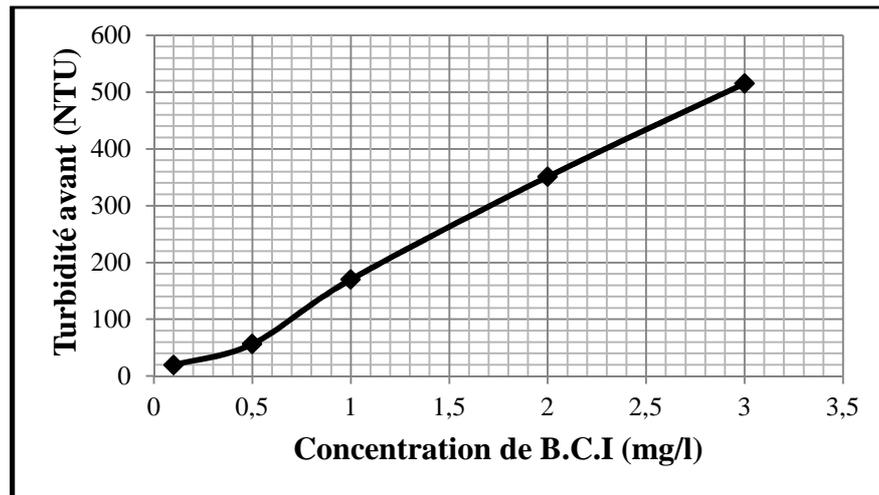


Figure III.1: Variation de la turbidité en fonction de B.C.I avant traitement.

b. Effet de B.C.I sur le pH :

Le pH augmente avec l'augmentation de la dose de la bentonite, ceci est dû essentiellement à la nature des fonctions chimiques à caractères basiques existant dans la structure de la bentonite(B.C.I) (Voire figure III.2).

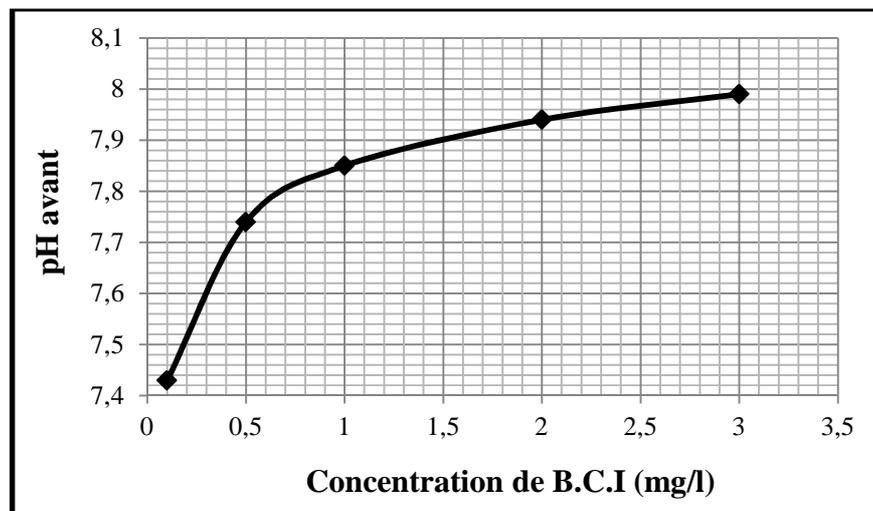


Figure III.2: Variation du pH en fonction de la concentration de B.C.I. avant traitement.

III.1.4. Décantabilité naturelle et essais de Jar-test :

III.1.4.1. Décantabilité naturelle (sans produits) : étude cinétique ;

Placer 1000 ml d'eau brute homogène dans un bécher et noter la turbidité après 5 ; 30 ; 60 et 90 minutes. Si le résultat obtenu est élevé, on doit injecter un coagulant pour améliorer la qualité de l'eau. On procède aux essais de Jar-Test.

III.1.4.2. Essais de Jar-Test :

Le but des essais de Jar-Test est de déterminer les concentrations optimales du coagulant et du floculant utilisé pour le traitement de coagulation floculation.

- ☞ La vitesse d'agitation rapide lors de la coagulation ;
- ☞ La durée de coagulation ;
- ☞ La vitesse d'agitation lente lors de la floculation ;
- ☞ La durée de floculation ;
- ☞ La durée de décantation ;

III.1.5. Résultats expérimentaux et interprétation :

Les résultats sont exprimés en fonction du pourcentage de réduction de la turbidité.

$$\% \text{ réduction de la turbidité} = \frac{\text{turbidité initiale} - \text{turbidité résiduelle}}{\text{turbidité initiale}} * 100 \quad (\text{III.1})$$

III.1.5.1. Etude cinétique :

Notre étude a été réalisée sur trois types d'échantillons qui portent des valeurs de turbidité croissante et de même salinité.

La turbidité du premier échantillon (0.1g/l de B.C.I) est 19.5 NTU \curvearrowright Eau légèrement trouble.

La turbidité du second (1g/l de B.C.I) et du troisième échantillon (3g/l de B.C.I) est supérieure à 50 NTU \curvearrowright Eau trouble.

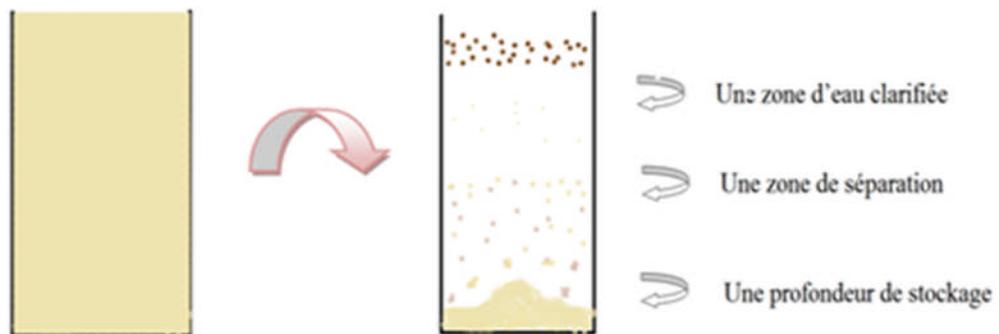


Figure III.3: Représentation d'une solution ([Na Cl]=38g/l+ 3g/l de B.C.I) dans un bécher de 1l après 4 heures de décantation.

a. Décantation naturelle de la B.C.I (sans coagulant) :

**Tableau III.3: La variation de la turbidité en fonction du temps de décantation
(Pour 38g/l de sel et 0.1g/l de B.C.I)**

Le temps (minutes)	Turbidité (NTU)				
	Directement (t=0)	5	30	60	90
Zone d'eau clarifiée	19.5	5.57	3.53	2.80	2.16
R (%)	/	71.43	81.89	85.64	88.92
Zone de séparation	19.5	7.81	4.52	3.54	2.79
R (%)	/	59.95	76.82	81.84	85.69

**Tableau III.4: La variation de la turbidité en fonction du temps de décantation
(Pour 38g/l de sel et 1 g/l de B.C.I)**

Le temps (minutes)	Turbidité (NTU)				
	Directement (t=0)	5	30	60	90
Zone d'eau clarifiée	170	24.30	23.10	19.50	15.60
R (%)	/	85.70	86.41	88.53	90.82
Zone de séparation	170	33.00	24.00	21.80	16.40
R (%)	/	80.59	85.88	87.18	90.35

**Tableau III.5: La variation de la turbidité en fonction du temps de décantation
(Pour 38g/l de sel et 3 g/l de B.C.I).**

Le temps (minutes)	Turbidité (NTU)				
	Directement	5	30	60	90
Zone d'eau clarifiée	515	124	44.2	32.4	27
R (%)	/	75.92	91.42	93.71	94.75
Zone de séparation	515	283	78.5	59.1	38.7
R (%)	/	45.05	84.76	88.52	92.48

Selon les résultats enregistrés, nous remarquons que les MES diminuent en fonction du temps de décantation et varient avec la hauteur, c'est-à-dire plus la hauteur est grande « profonde » plus la zone est turbide.

Nous constatons qu'après une heure et demie de décantation la solution reste toujours turbide avec une valeur supérieure à 15 NTU pour une eau chargée de 1g/l et supérieur à 27 NTU pour une solution chargé en 3 g/l de B.C.I. Pour la solution la plus diluée 0.1g/l de B.C.I, la valeur de la turbidité est de l'ordre de 2 NTU.

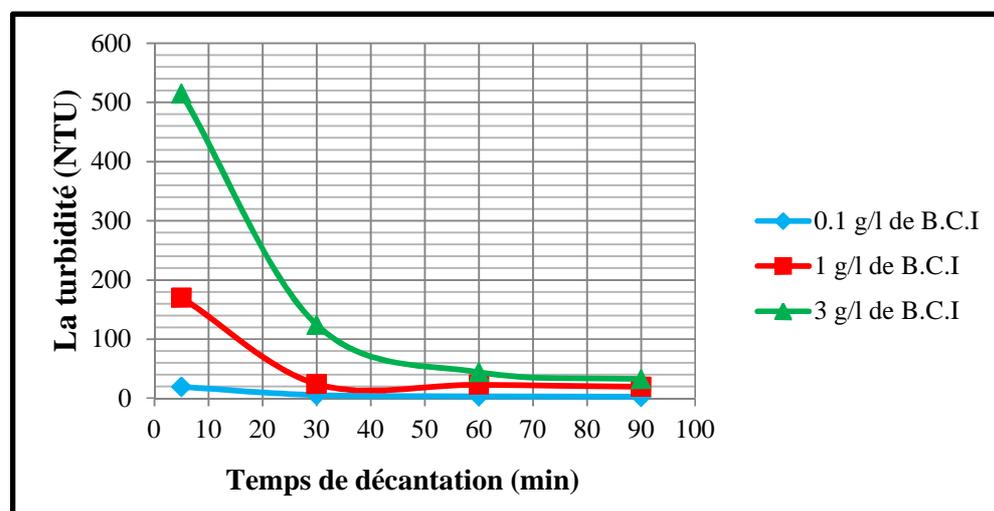


Figure III.4: Décantation naturelle de la B.C.I zone d'eau clarifiée (sans coagulant).

La décantation naturelle correspond à une sédimentation de la bentonite (B.C.I) en absence du coagulant.

Le tracé de la variation de la turbidité en fonction du temps de décantation pour les trois solutions de l'eau de différente concentration de B.C.I (0.1g/l ; 1 g/l et 3g/l) et de même concentration de sel (38g/l), a permis d'obtenir des courbes représenter dans la figure (III.4).

Nous remarquons une diminution rapide de la turbidité jusqu'à l'obtention d'un palier, et ce pour toutes les concentrations de la bentonite B.C.I(0.1g/l ; 1 g/l et 3g/l) Cette diminution est d'autant plus accentuée que la concentration de bentonite est élevée. La durée de la diminution rapide est de 30 minutes pour les charges allant de 1 à 3g/l et surtout pour la plus grande charge (3 g/l). Notons que le palier constant augmente avec la concentration de la bentonite.

La décantation naturelle ne peut jamais atteindre à un état de clarification complète. Elle n'élimine que des composés minéraux et organiques décantables qui ont une densité supérieure à celle de l'eau. Il reste des particules stables non décantables qui sont responsables de la couleur et la turbidité de l'eau, dites particules colloïdales [88].

La décantation naturelle de ces particules est très lente, atteindre souvent plusieurs jours ou même des années pour cela la coagulation floculation a pour but d'accélérer la décantation de ces particules [12].

b. Décantation avec un coagulant (concentration optimale de coagulant de chaque qualité d'eau) :

Tableau III.6 : Réduction de la turbidité pour différents temps de décantation pour une eau salée turbide (0.1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

Le temps (minutes)	Turbidité (NTU)					
	L'eau brute	Directement	5	30	60	90
Zone d'eau clarifiée	19.5	15.7	1.62	0.49	0.41	0.36
R (%)	/	19.48	91.69	97.49	97.89	98.15
Zone de séparation	19.5	15.7	5.88	1.22	1.19	1.07
R (%)	/	19.48	69.85	93.74	93.9	94.51

Tableau III.7: Réduction de la turbidité pour différentes temps de décantation pour une eau salée turbide (1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

Le temps (minutes)	Turbidité (NTU)					
	L'eau brute	Directement	5	30	60	90
Zone d'eau clarifiée	170	56.4	1.92	0.52	0.43	0.37
R (%)	/	66.82	98.87	99.69	99.75	99.78
Zone de séparation	170	56.4	2.05	1.80	1.43	0.72
R (%)	/	66.82	98.79	98.94	99.16	99.58

Tableau III.8: Réduction de la turbidité pour différentes temps de décantation pour une eau salée turbide (3 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

Le temps (minutes)	Turbidité (NTU)					
	L'eau brute	Directement	5	30	60	90
Phase clarifié	515	65.8	2.99	0.54	0.46	0.39
R (%)	/	87.22	99.42	99.89	99.91	99.92
2/3 hauteur	515	65.8	7.72	1.24	1.17	1.05
R (%)	/	87.22	98.5	99.76	99.77	99.80

Après un temps de séjour de 90 minutes, la majorité des matières en suspension ont décantées. Les caractéristiques donnant la variation de la turbidité en fonction du temps de décantation pour différents dose du coagulant et concentrations de bentonite (B.C.I), sont représentées sur la figure (III.5).

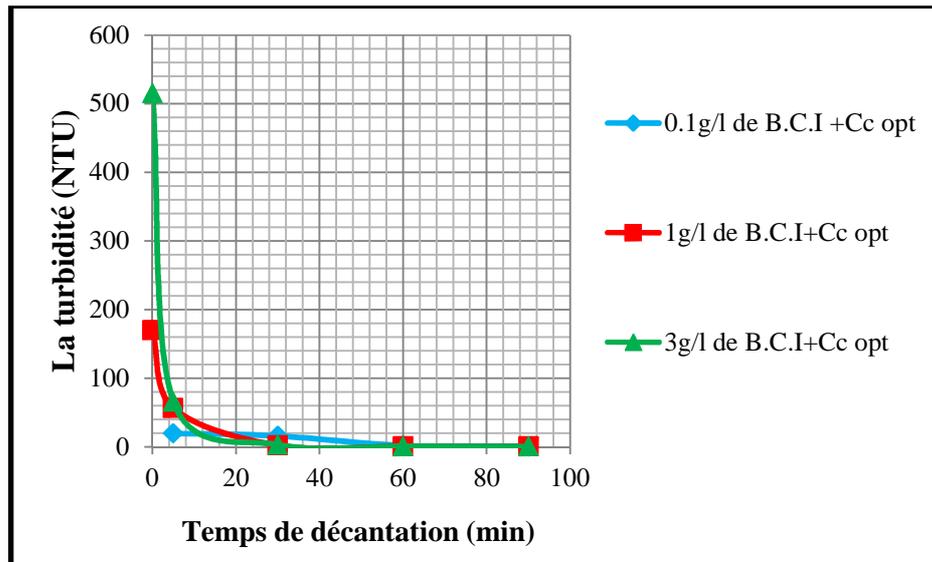


Figure III.5: Décantation avec la C_c optimal de chaque dose de la B.C.I en fonction de temps.

Après avoir ajouté un coagulant à une solution la décantation de la bentonite(B.C.I) en suspension est favorisée par l'effet de la compression de la double couche des particules causée par l'existence des sels minéraux dissous dans l'eau.

Cependant, la décantation sans addition d'un coagulant n'accomplie pas l'objectif du traitement où la turbidité doit être très faible.

Lors de l'addition du coagulant, nous avons observé un éclaircissement de la solution turbide (initialement de couleur blanchâtre) et apparition de gros flocons. Au bout des 5 premières minutes de la période de décantation, nous avons remarqué, pour les doses d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, une sédimentation quasi- totale des flocons.

La dose du coagulants permet de diminuer la turbidité, et ce pour toutes les charges initiales de la bentonite (B.C.I) que nous avons choisies.

III.1.5.2. Détermination de la concentration optimale de coagulant :

Une première série d'essais est effectuée sur une eau salée turbide avec des doses croissantes de sulfate d'alumine (figure III.6) pour approcher la concentration optimale du coagulant.

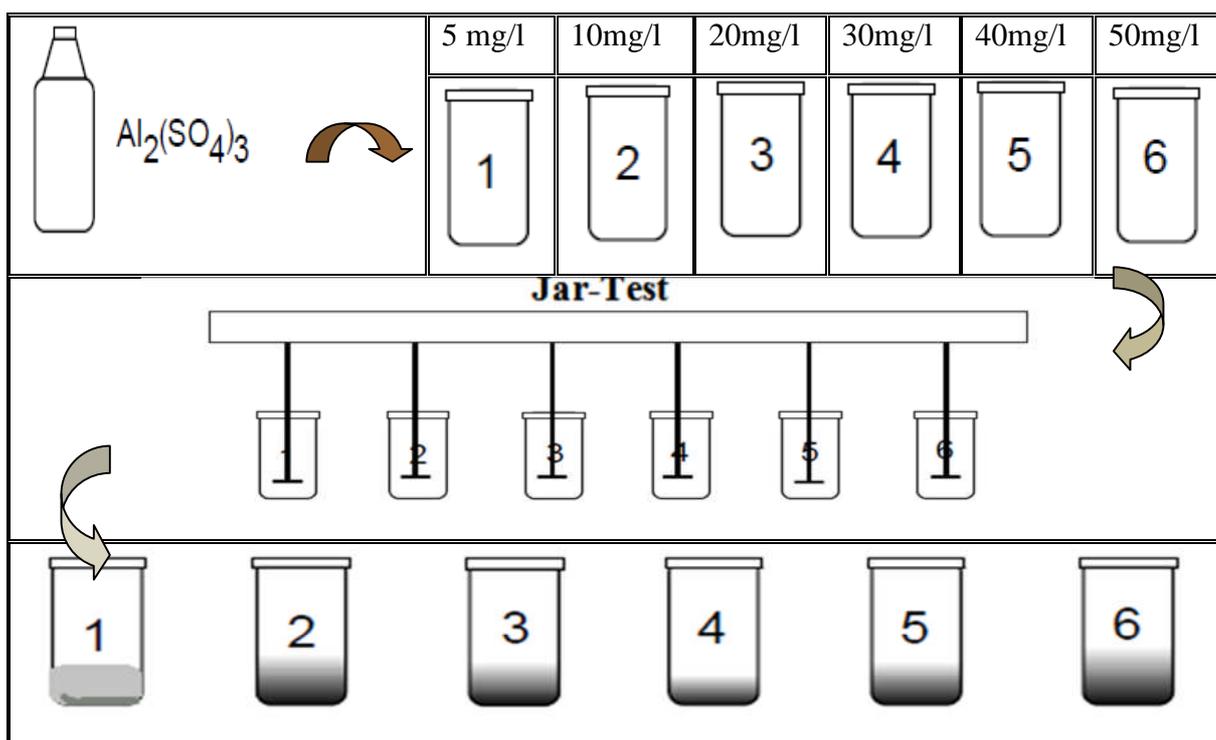


Figure III.6: Les étapes suivies pour l’obtention de la dose optimale du coagulant.

La dose optimale de coagulant est celle grâce à laquelle le surnageant est le plus limpide.

Après décantation, nous avons prélevé une certaine quantité d’eau tout en évitant une éventuelle remise en suspension du floc, et nous avons déterminé les divers paramètres les plus influencés par cette étape. Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux (III.9 ; III.10; III.11 ; III.12 et III.13).

Tableau III.9: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d’alumine pour une eau salée turbide (0.1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

<i>Gamme 1</i>						
<i>0.1 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d’alumine (mg/l)					
	5	10	20	30	40	50
Turbidité (NTU)	3.99	2.44	1.31	0.79	0.9	1.59
R (%)	79.54	87.49	93.28	95.95	95.38	91.85
Température (°C)	18.1	18	18	18	18	18
pH	7.33	7.30	7.26	7.19	6.87	6.52
Conductivité (µs/cm)	57100	57200	57400	57600	57800	58000

<i>Gamme 2</i>						
<i>0.1 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	22	25	28	32	<u>35</u>	38
Turbidité (NTU)	1.06	0.99	0.92	0.76	<u>0.71</u>	0.73
R (%)	94.56	94.92	95.28	96.10	<u>96.36</u>	96.26
Température (°C)	18.1	18.1	18.2	18.1	<u>18.2</u>	18.1
pH	7.26	7.24	7.20	7.16	<u>7.12</u>	6.95
Conductivité (µs/cm)	57400	57500	57500	57600	<u>57700</u>	57700

La concentration optimale en coagulant est de 35 mg $Al_2(SO_4)_3/L$.

Tableau III.10 : Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d'alumine pour une eau salée turbide (0.5g/l B.C.I et 38g/l de sel)

<i>Gamme 1</i>						
<i>0.5 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	10	20	30	<u>40</u>	50	60
Turbidité (NTU)	1.09	0.66	0.58	<u>0.41</u>	0.54	0.73
R (%)	98.08	98.84	98.98	<u>99.28</u>	99.05	98.71
Température (°C)	19.6	19.9	19.9	<u>19.8</u>	19.8	19.8
pH	7.65	7.57	7.49	<u>7.29</u>	7.04	6.87
Conductivité (µs/cm)	59300	59500	59600	<u>59700</u>	59900	60000
<i>Gamme 2</i>						
<i>0.5 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	32	35	38	42	45	48
Turbidité (NTU)	0.56	0.54	0.44	0.43	0.49	0.51
R (%)	99.01	99.05	99.23	99.24	99.14	99.10
Température (°C)	20	19.8	20	20	19.9	19.7
pH	7.42	7.39	7.32	7.21	7.16	7.10
Conductivité (µs/cm)	59600	59700	59700	59700	59800	59800

La concentration optimale en coagulant est de 40 mg $Al_2(SO_4)_3/L$.

Tableau III.11: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d'alumine pour une eau salée turbide (1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

<i>Gamme 1</i>						
<i>1 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	40	50	60	70	80	90
Turbidité (NTU)	1.79	1.05	0.75	0.74	1.95	2.90
R (%)	98.95	99.38	99.55	99.56	98.85	98.29
Température (°C)	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.4
pH	7.40	7.31	7.23	6.94	6.71	6.68
Conductivité (µs/cm)	58000	58200	58400	58600	58800	59000
<i>Gamme 2</i>						
<i>1 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	62	65	68	72	75	78
Turbidité (NTU)	0.57	<u>0.54</u>	0.61	0.89	0.99	1.43
R (%)	99.66	<u>99.68</u>	99.64	99.48	99.42	99.16
Température (°C)	19.3	<u>19.4</u>	19.4	19.4	19.5	19.5
pH	7.18	<u>7.11</u>	7.03	6.90	6.85	6.79
Conductivité (µs/cm)	58400	<u>58500</u>	58500	58600	58700	58700

La concentration optimale en coagulant est de 65 mg $Al_2(SO_4)_3/L$.

Tableau III.12: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d'alumine pour une eau salée turbide (2 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

<i>Gamme 1</i>						
<i>2 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	60	70	80	90	100	110
Turbidité (NTU)	0.92	0.83	0.78	0.67	0.93	1.06
R (%)	99.74	99.76	99.77	99.81	99.74	99.70
Température (°C)	20	20	19.3	20	19.9	20
pH	6.69	6.60	6.53	6.34	5.84	5.6
Conductivité (µs/cm)	58500	58700	59000	59200	59500	59700

<i>Gamme 2</i>						
<i>2 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	<u>82</u>	85	88	92	95	98
Turbidité (NTU)	<u>0.31</u>	0.57	0.72	0.7	0.75	0.91
R (%)	<u>99.91</u>	99.84	99.79	99.80	99.79	99.74
Température (°C)	<u>18</u>	18	18	18	18	18
pH	<u>6.49</u>	6.45	6.42	6.27	6.20	5.98
Conductivité (µs/cm)	<u>59000</u>	59100	59200	59300	59300	59400

La concentration optimale en coagulant est de 82 mg $Al_2(SO_4)_3/L$.

Tableau III.13: Evolution des paramètres en fonction de la dose de sulfate d'alumine pour une eau salée turbide (3 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

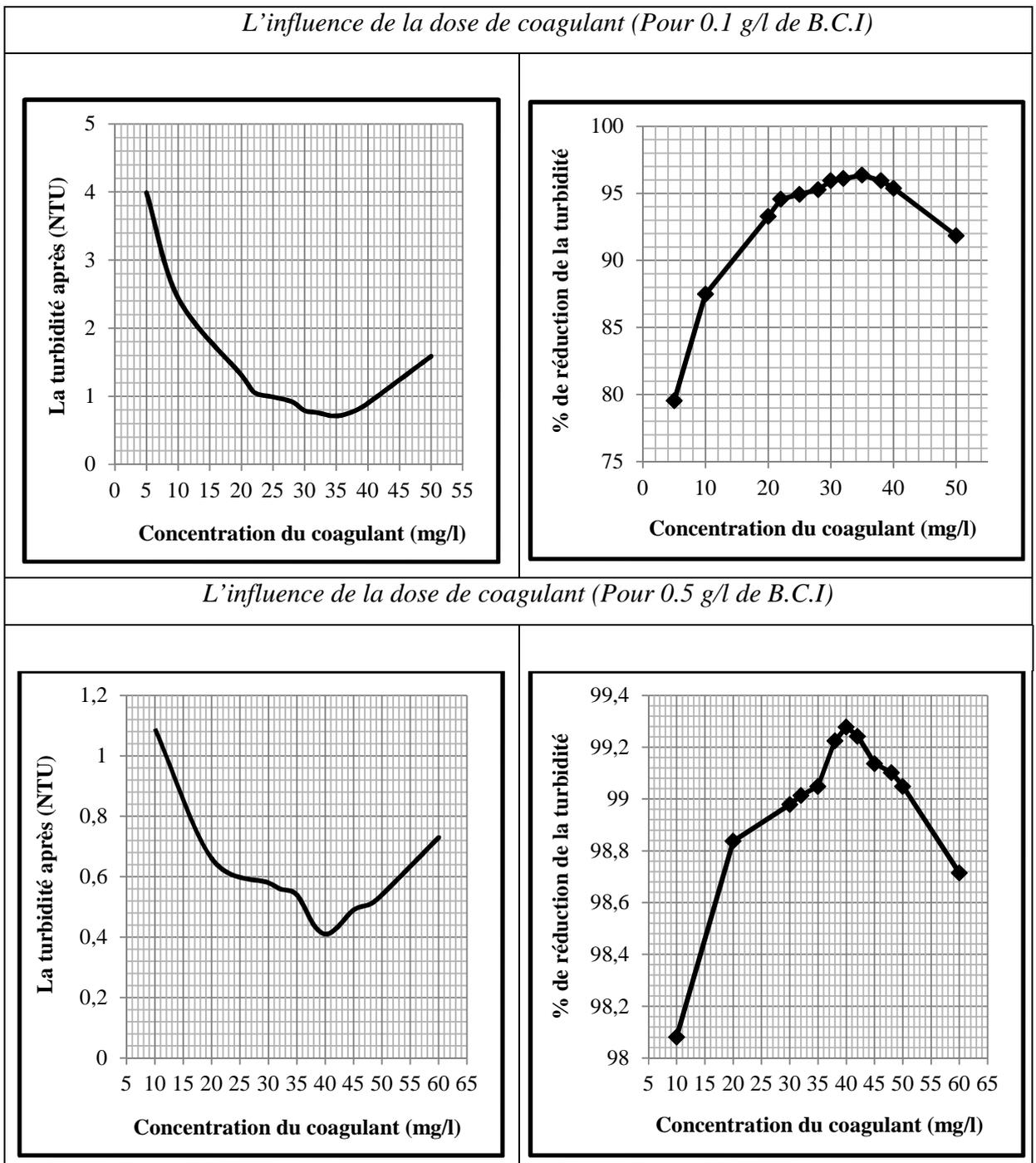
<i>Gamme 1</i>						
<i>3 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	80	<u>90</u>	100	110	120	130
Turbidité (NTU)	1.09	<u>0.58</u>	1.26	1.64	1.80	2.03
R (%)	99.79	<u>99.89</u>	99.76	99.68	99.65	99.61
Température (°C)	18.3	<u>18.4</u>	18.3	18.4	18.2	18.3
pH	6.62	<u>6.51</u>	5.8	5.63	5.59	5.52
Conductivité (µs/cm)	58900	<u>59100</u>	59300	59500	59700	60000
<i>Gamme 2</i>						
<i>3 g/l B.C.I</i>	La dose injectée de sulfate d'alumine (mg/l)					
	82	85	88	92	95	98
Turbidité (NTU)	1.54	1.16	1.09	0.98	1.26	1.12
R (%)	99.70	99.77	99.79	99.81	99.76	99.7
Température (°C)	18.3	18.4	18.5	18.4	18.4	18.4
pH	6.58	6.54	6.52	6.30	6.24	5.88
Conductivité (µs/cm)	58900	59000	59100	59100	59200	59200

La concentration optimale en coagulant est de 90 mg $Al_2(SO_4)_3/L$.

Les courbes qu'on peut facilement déduire sont :

- 1- L'influence de la turbidité de l'eau brute sur la dose optimale de coagulant;
Turbidité après = f (concentrations du coagulant).
- 2- Le pH après manipulation en fonction de la concentration du coagulant ;
pH après = f (concentration du coagulant).
- 3- La conductivité après manipulation en fonction de la concentration du coagulant ;
Conductivité après = f (concentration du coagulant).

a. Effet de la concentration du coagulant sur la turbidité :



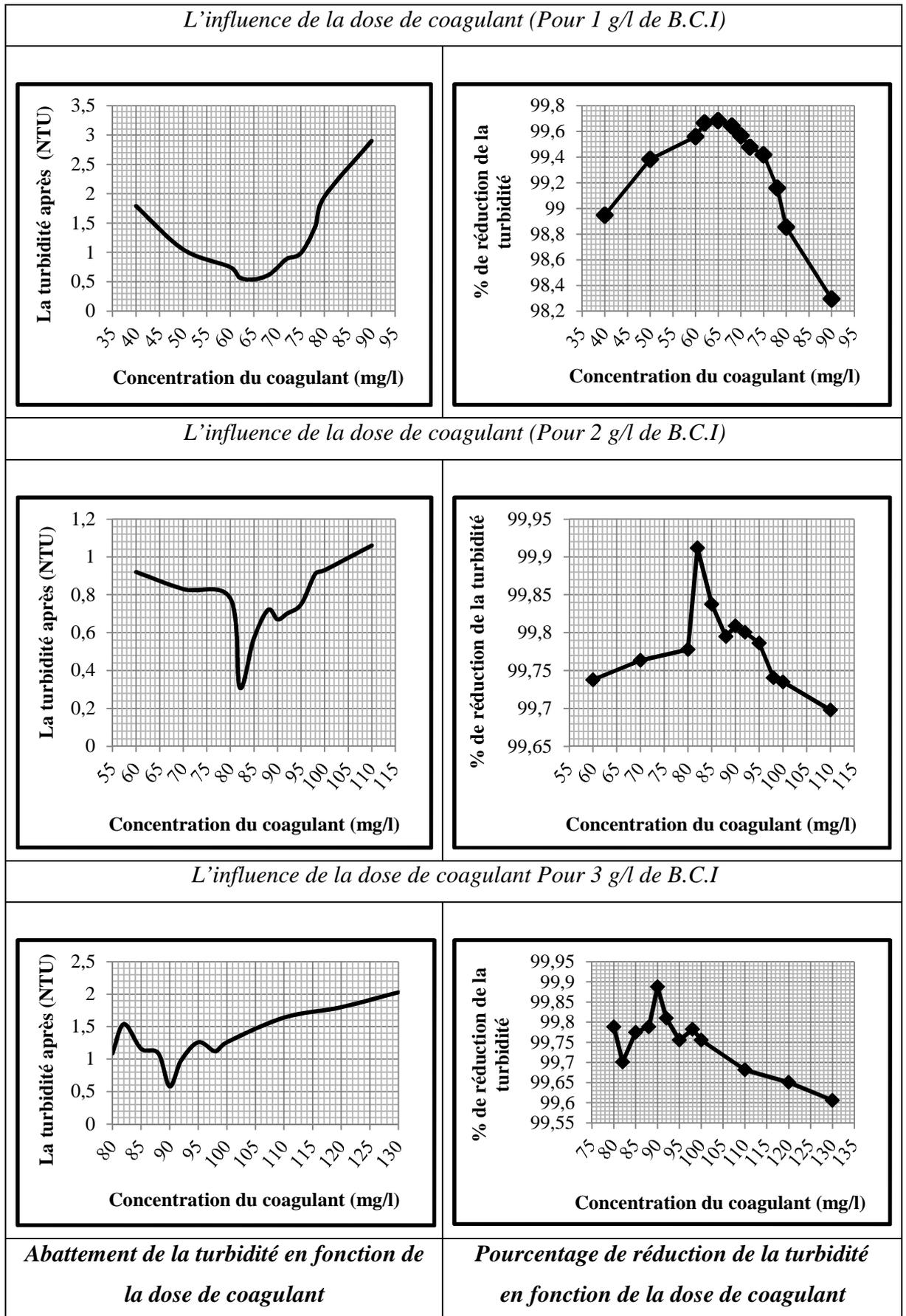


Figure III.7: L'influence de la dose du sulfate d'alumine sur la coagulation floculation.

L'ensemble des graphes obtenus lors des essais de coagulation, sont illustrés respectivement sur la figure (III.7), nous donne la variation de la turbidité en fonction des différentes doses de coagulant ajoutés, celle-ci nous permet de connaître la quantité du coagulant à mettre en œuvre pour obtenir à une bonne coagulation correspondant à une turbidité minimale.

Toutes les courbes obtenues possèdent un minimum considéré comme le point d'intersection de deux branches :

- La branche de gauche correspond à la neutralisation des charges électriques des particules qui se grossissent par l'agglomération et la sédimentent.
- La branche de droite ou la turbidité commence accroître traduit la restabilisation des particules, due à l'excès des charges de même signe qui empêchent ces particules de s'agglomérer. Ce sont des forces stabilisatrices [98].

Et cela nous confirme que la dose optimale du coagulant et l'allure des deux courbes nous montre bien que la dose 35mg/l (cas de 0.1g/l de B.C.I) représente la dose optimale car c'est le point correspondant à la plus faible valeur de la turbidité où la courbe est décroissante avant cette dose puis devienne croissante.

On comprend de cela que la surdose en coagulant provoque la restabilisation des particules colloïdales ainsi la disponibilité de leurs sites diminue et empêche la formation des ponts inter-particulaires et on aura donc une eau très chargée en coagulant avec une mauvaise clarification. [95]

L'intérêt de ces courbes dans la connaissance de la dose optimale du réactif (coagulant) qu'il faut ajouter en vue d'atteindre une neutralisation total des forces stabilisatrice.

Le tracé de pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du sulfate d'alumine pour divers solutions de l'eau de différente concentration de B.C.I(0.1g/l ; 0.5g/l ; 1g/l ; 2 g/l et 3 g/l) et de même concentration de sel (38 g/l), a permis d'obtenir des courbes représenter dans la même figure (III.7).

A partir des résultats de coagulation sur les eaux traitées par des doses croissantes de sulfate d'alumine, nous avons pu constater que le pourcentage de réduction de la turbidité augmente jusqu'à la dose optimale. Après cette dose il se produit l'effet inverse du sulfate d'alumine (dé-coagulation) donc la turbidité diminue avec l'augmentation du sulfate d'alumine jusqu'à la dose optimale.

L'ajout d' Al^{3+} permet la coagulation du fait de l'effet lié à l'augmentation de la force ionique (compression de la couche diffuse), le mécanisme de la coagulation repose sur la

neutralisation de la charge négative des particules stables par adsorption des cations sur leur surface. Par contre, la surdose de coagulant, source de cations, peut résulter en une adsorption trop importante de cations et inverser la charge des particules qui deviennent alors positive. Les particules seraient ainsi restabilisées [84].

Pour 0.1 g/l de B.C.I :

On remarque bien que l'addition de 35 mg/l du coagulant a provoqué la diminution de la valeur de la turbidité de 19.5 à 0.71NTU.

A partir de ce résultat, on remarque qu'un meilleur rendement d'élimination de la turbidité est (96.36 %).

Pour 0.5 g/l de B.C.I :

Pour une dose de 40 mg/l de sulfate d'alumine, nous obtenons un pourcentage de réduction de la turbidité de 99.28 % et une diminution de la valeur de la turbidité de 56.8 à 0.41 NTU.

Pour 1 g/l de B.C.I :

Pour une concentration de 65 mg/l en alun le pourcentage de réduction de la turbidité est de 99.68 %, et la valeur de la turbidité diminue de 170 à 0.54 NTU.

Pour 2 g/l de B.C.I :

On remarque bien que l'addition de 82 mg/l du coagulant a provoqué la diminution de la valeur de la turbidité de 351 à 0.31 NTU.

A partir de ce résultat, on remarque qu'un meilleur rendement d'élimination de la turbidité est 99.91 %

Pour 3 g/l de B.C.I :

Pour une dose de 90 mg/l de sulfate d'alumine, nous obtenons un pourcentage de réduction de la turbidité de 99.89 % et une diminution de la valeur de la turbidité de 515 à 0.58 NTU.

On peut déduire que :

Les doses optimales de sulfate d'alumine varient suivant la qualité de l'eau brute.

Nous remarquons que le traitement effectué abaisse la turbidité.

b. Effet de la concentration du coagulant sur le pH :

Les résultats obtenus présentant la variation de pH en fonction de la dose du sulfate d'alumine, sont illustrés respectivement sur les figures (III.8 ; III.9 ; III.10 ; III.11 et III.12) :

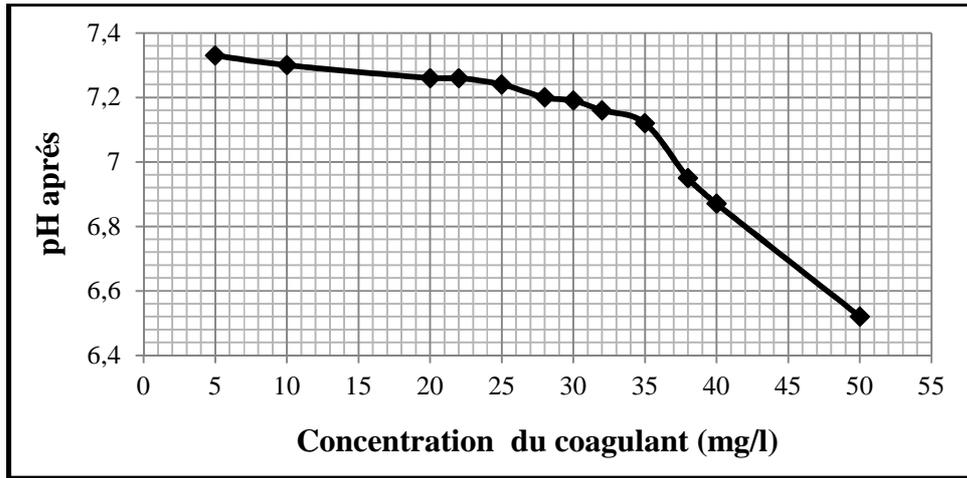


Figure III.8: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 0.1 g/l de B.C.I.

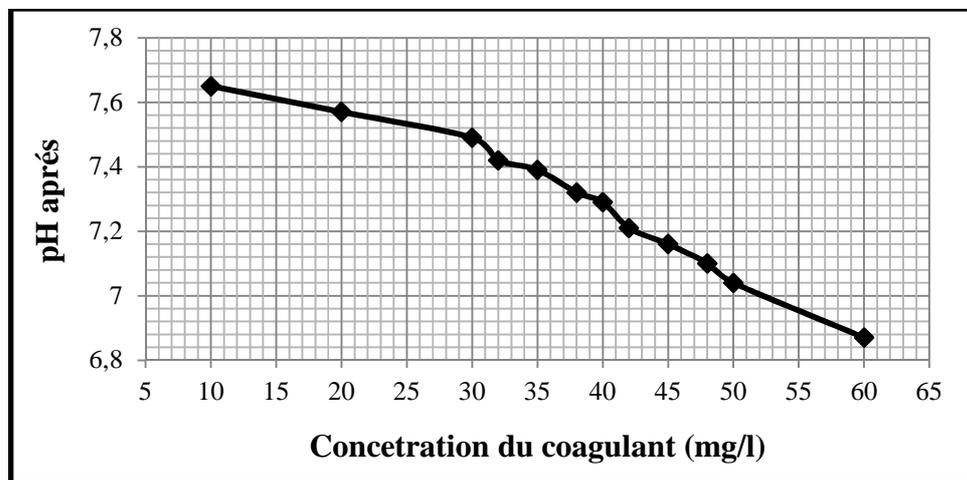


Figure III.9: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 0.5 g/l de B.C.I.

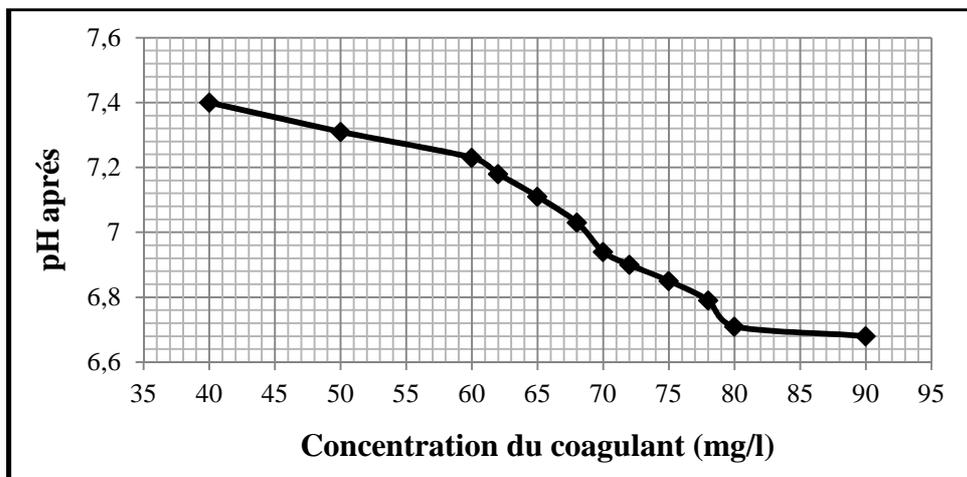


Figure III.10: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 1 g/l de B.C.I.

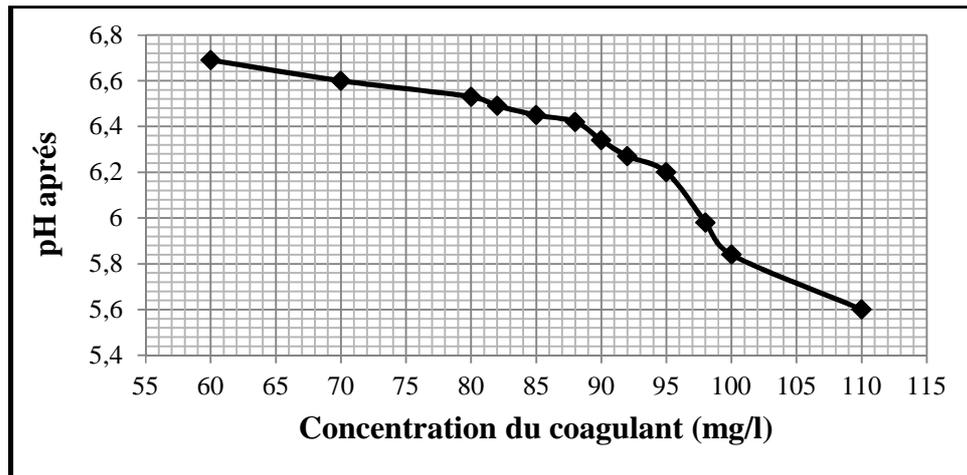


Figure III.11: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 2 g/l de B.C.I.

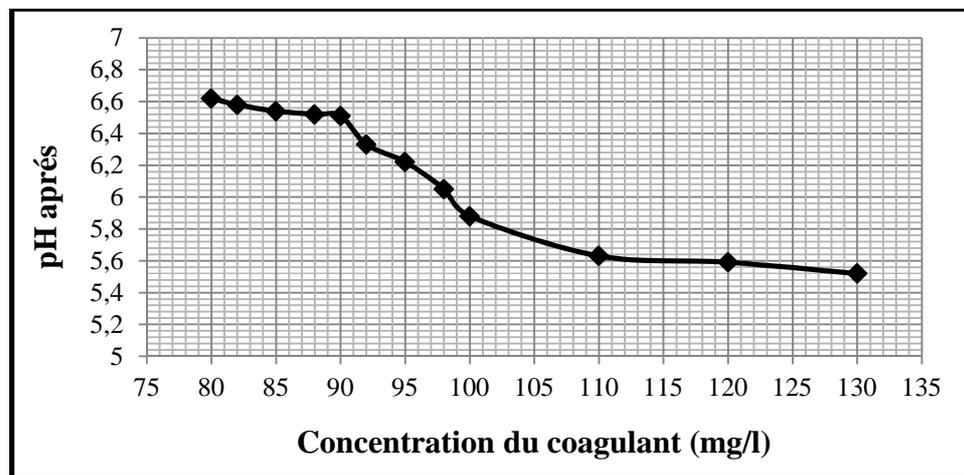


Figure III.12: Courbe expérimentale de la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 3 g/l de B.C.I.

A partir des résultats on remarque que le pH diminue avec l'augmentation de la dose de sulfate d'alumine. La valeur du pH continue à diminuer en augmentant la concentration du coagulant.

Nous remarquons dans les figures (III.8 ; III.9 ; III.10 ; III.11 et III.12) que la variation du pH après coagulation en fonction des concentrations du coagulant est toujours une fonction décroissante en fonction de la concentration du coagulant jusqu'à l'acidification du milieu, cela est dû à l'effet acidifiant du produit.

Les résultats obtenus confirment les données bibliographiques, concernant l'ajout du coagulant qui entraîne la formation d'hydroxyde du métal avec libération d'une certaine acidité (hydrolyse) ce qui explique la diminution de la valeur du pH [89].

Le pH reste à la neutralité pour tous les coagulants.

c. Effet de la concentration du coagulant sur la conductivité :

D'après les résultats obtenus, on observe que la conductivité augmente avec l'augmentation de la dose de sulfate d'alumine.

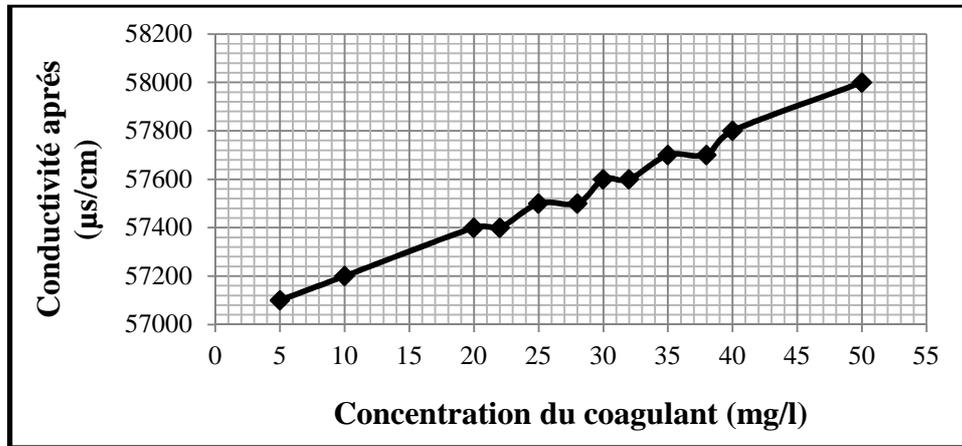


Figure III.13: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 0.1 g/l de B.C.I.

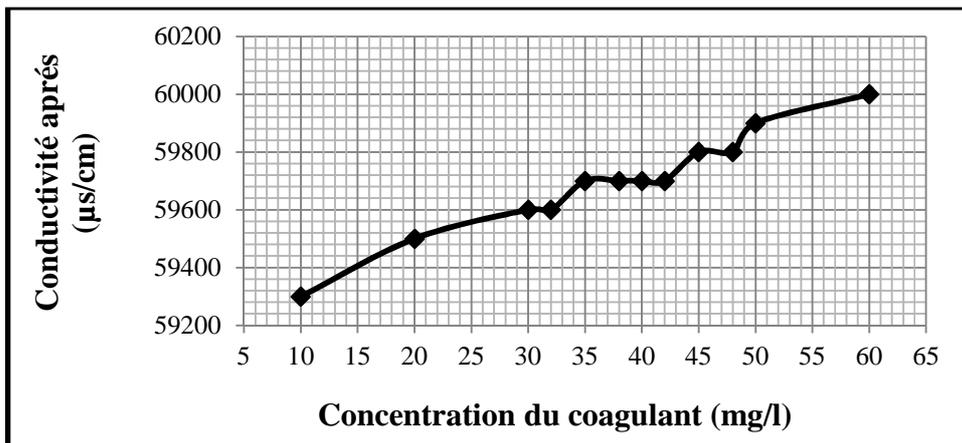


Figure III.14: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 0.5 g/l de B.C.I.

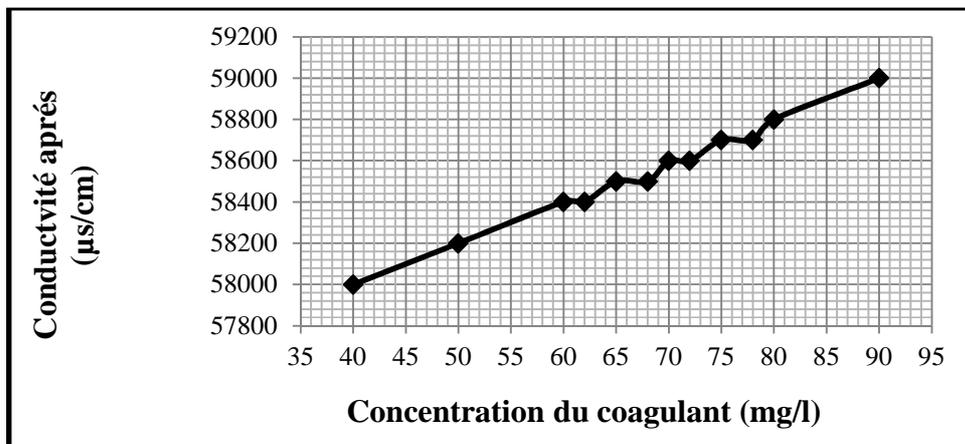


Figure III.15: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 1 g/l de B.C.I.

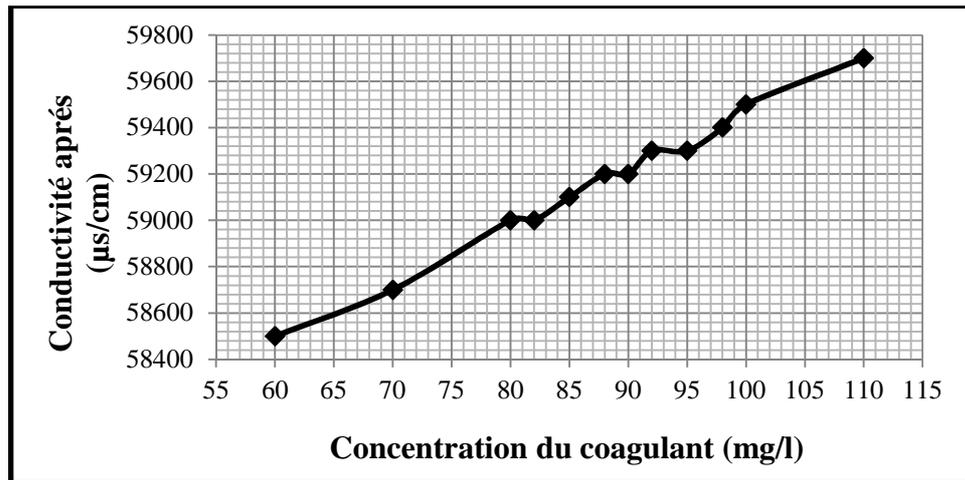


Figure III.16: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 2 g/l de B.C.I.

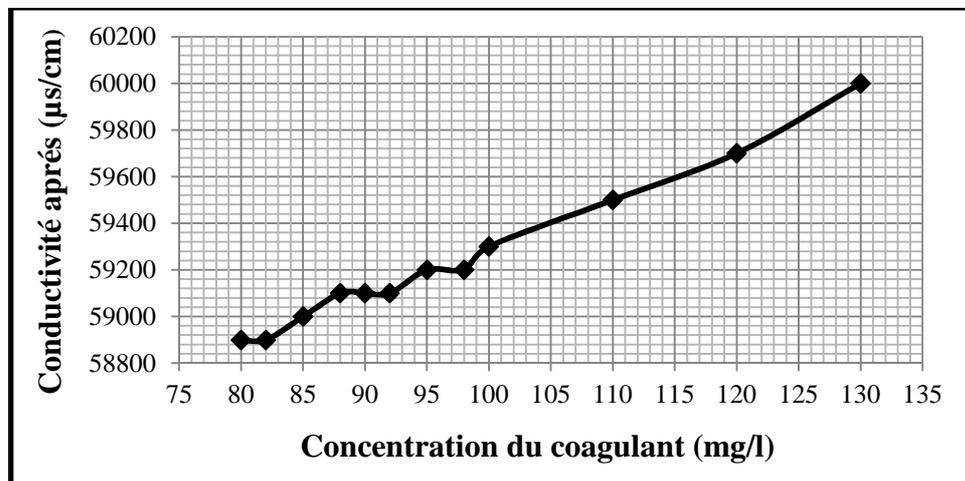


Figure III.17: Variation de la conductivité après coagulation en fonction des concentrations du coagulant pour une concentration de 3 g/l de B.C.I.

Les figures (III.13 ; III.14 ; III.15 ; III.16 et III.17) représentent la variation expérimentale de la conductivité après coagulation en fonction de la variation des concentrations du coagulant. En gros, cette variation est toujours une fonction croissante.

Nous avons mentionné que la conductivité augmente avec l'augmentation des concentrations des réactifs (coagulants) injectés (la conductivité augmente à cause des ions sulfates utilisés pour la coagulation).

III.1.5.3. Détermination de la concentration optimale de flocculant :

Dans une série d'échantillons nous injectons une même dose de coagulant. Nous utiliserons les résultats de la manipulation précédente : le meilleur résultat ayant été observé pour une dose de :

	35 mg/L de sulfate d'aluminium		0.1g/l de B.C.I
	40 mg/L de sulfate d'aluminium		0.5g/l de B.C.I
	65 mg/L de sulfate d'aluminium		1 g/l de B.C.I
	82 mg/L de sulfate d'aluminium		2 g/l de B.C.I
	90 mg/L de sulfate d'aluminium		3 g/l de B.C.I

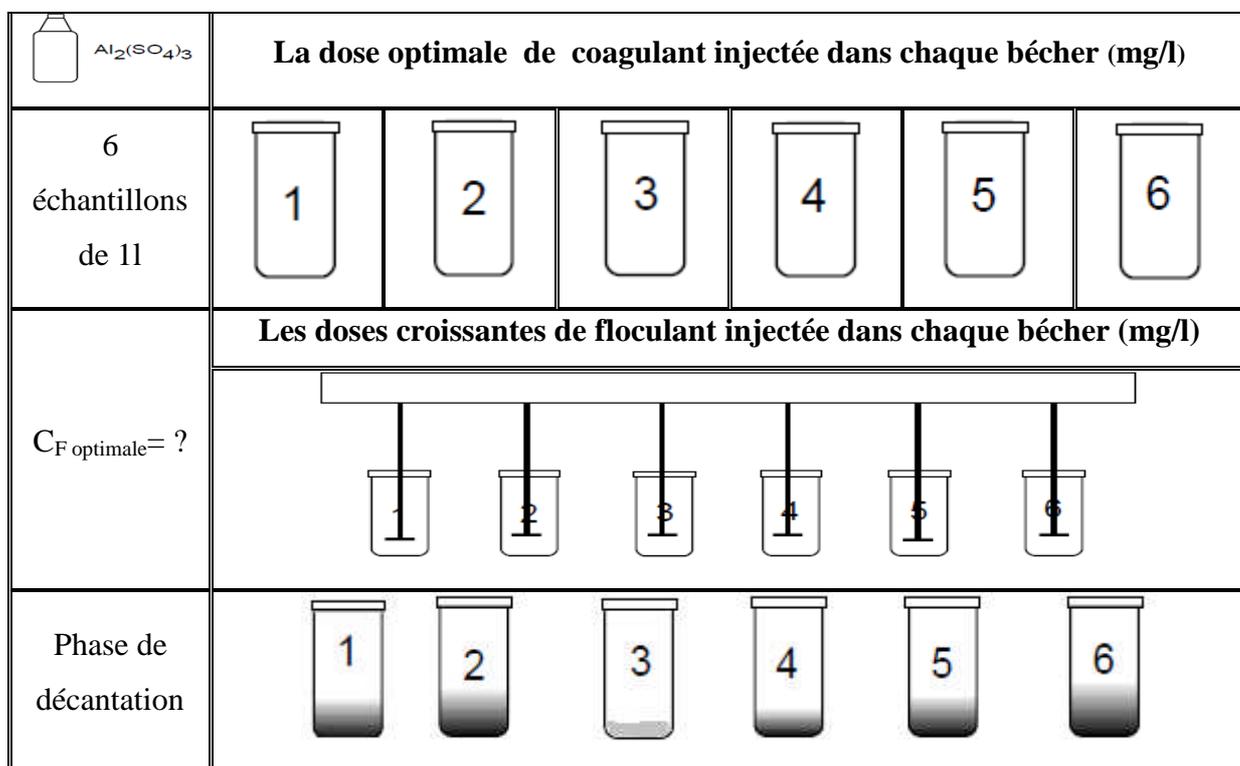


Figure III.18 : Les étapes suivies pour l'obtention de la dose optimale du floculant.

Les résultats expérimentaux sont notés dans les tableaux (III.14 ; III.15 ; III.16 et III.17).

Tableau III.14: L'influence de la concentration de polymère sur la coagulation floculation d'une eau salée turbide (0.1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

0.1g/l de B.C.I	La dose injectée de polymère (mg/l)								
	0.05	0.1	0.2	<u>0.25</u>	0.5	1	1.5	1.75	2
Turbidité	0.61	0.55	0.53	<u>0.39</u>	0.47	0.59	0.62	0.71	0.98
R (%)	96.87	97.18	97.28	<u>98.00</u>	97.59	96.97	96.82	96.36	94.97
Température (°C)	20.1	20.2	20.2	<u>20.1</u>	20.1	20.1	20.2	20.2	20.1
pH	7.12	7.11	7.09	<u>7.10</u>	7.09	7.08	7.07	7.10	7.12
Conductivité	57900	57800	57800	<u>57900</u>	57900	57800	57700	57800	57800

Tableau III.15: L'influence de la concentration de polymère sur la coagulation floculation d'une eau salée turbide (0.5 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

Gamme 1									
0.5 g/l de B.C.I	La dose injectée de polymère (mg/l)								
	0.1	0.2	0.25	0.5	0.6	0.7	<u>0.75</u>	0.8	0.9
Turbidité (NTU)	0.70	0.61	0.57	0.55	0.48	0.45	<u>0.39</u>	0.4	0.4
R (%)	98.77	98.93	98.99	99.03	99.15	99.21	<u>99.31</u>	99.29	99.29
Température (°C)	20.4	21.1	19.8	20.1	20.1	20.1	<u>20.1</u>	20.1	20.0
pH	7.24	7.26	7.23	7.25	7.23	7.20	<u>7.20</u>	7.22	7.24
Conductivité (µs/cm)	59700	59700	59800	59800	59800	59700	<u>59700</u>	59700	59800
Gamme 2									
0.5 g/l de B.C.I	La dose injectée de polymère (mg/l)								
	1	1.25	1.75	2	2.25	3	4	5	6
Turbidité (NTU)	0.41	0.43	0.47	0.51	0.73	0.76	0.72	0.57	0.62
R (%)	99.28	99.24	99.17	99.10	98.71	98.66	98.73	99.00	98.91
Température (°C)	20.2	19.8	19.8	19.9	20	19.7	19.6	19.6	19.6
pH	7.24	7.27	7.23	7.22	7.26	7.3	7.27	7.24	7.24
Conductivité (µs/cm)	59800	59800	59900	59900	59900	59800	59700	59800	59900

Tableau III.16: L'influence de la concentration de polymère sur la coagulation floculation d'une eau salée turbide (1 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

1g/l de B.C.I	La dose injectée de polymère (mg/l)							
	0.0625	0.125	0.25	0.375	0.50	<u>0.75</u>	1.00	1.25
Turbidité(NTU)	0.88	0.72	0.69	0.8	0.52	<u>0.45</u>	1.04	1.07
R (%)	99.48	99.58	99.59	99.53	99.69	<u>99.74</u>	99.39	99.37

Température (°C)	19.7	19.6	19.7	19.8	19.9	<u>19.9</u>	19.4	19.4
pH	7.13	7.10	7.12	7.09	7.09	<u>7.11</u>	7.10	7.13
Conductivité (µs/cm)	58700	58700	58600	58700	58800	<u>58600</u>	58500	58500

Tableau III.17 : L'influence de la concentration de polymère sur la coagulation floculation d'une eau salée turbide (2 g/l B.C.I et 38g/l de sel)

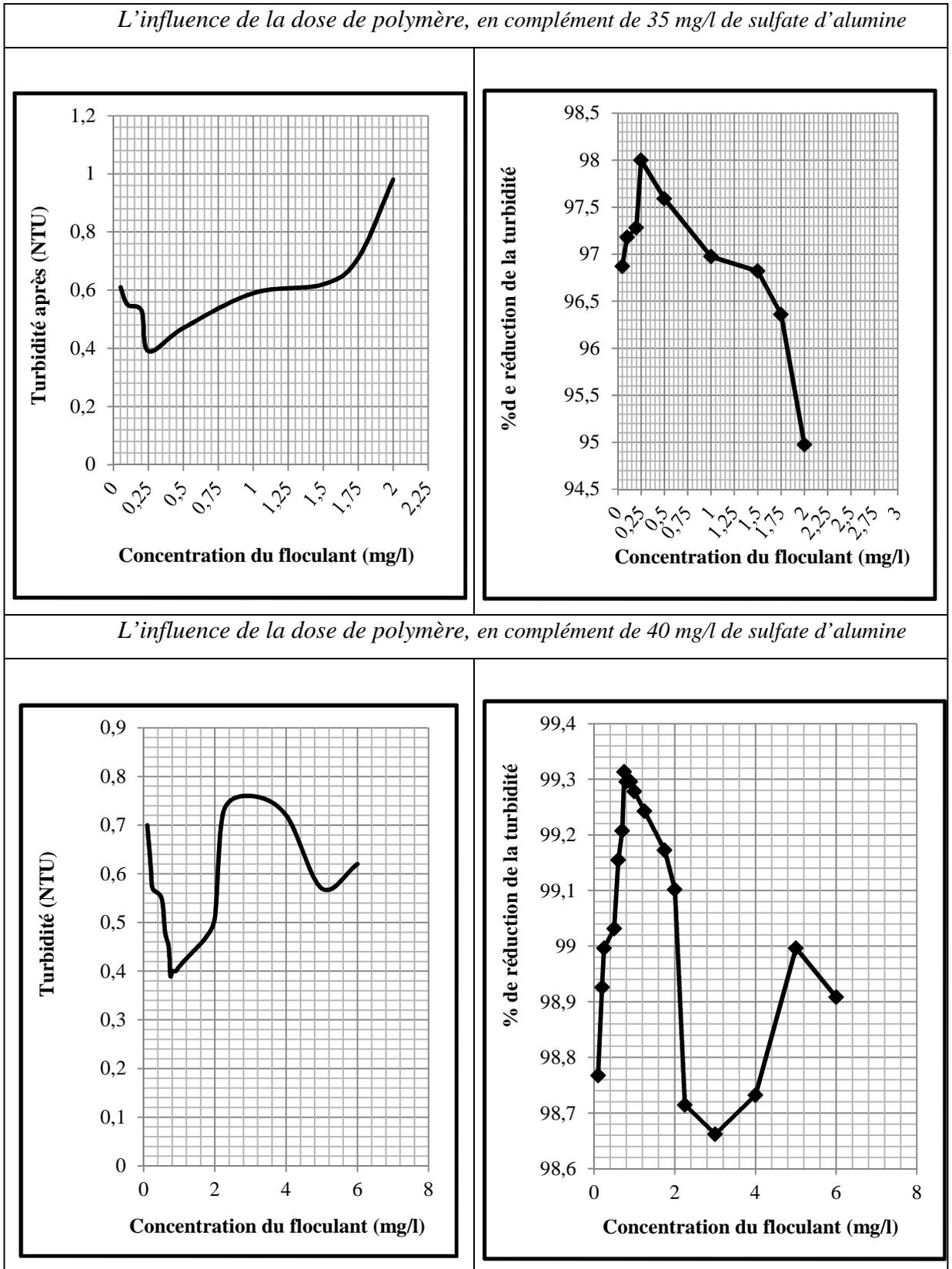
Gamme 1						
2 g/l de B.C.I	La dose injectée de polymère (mg/l)					
	0.5	<u>1</u>	1.5	2	2.5	3
Turbidité (NTU)	0.43	<u>0.26</u>	0.37	0.64	0.81	0.94
R (%)	99.88	<u>99.93</u>	99.89	99.82	99.77	99.73
Température (°C)	20.7	<u>20.6</u>	20.6	20.7	20.6	20.5
pH	6.50	<u>6.50</u>	6.52	6.51	6.52	6.53
Conductivité (µs/cm)	59300	<u>59000</u>	59100	59200	59000	59400
Gamme 2						
2 g/l de B.C.I	La dose injectée de polymère (mg/l)					
	4	6	8	10	12	14
Turbidité (NTU)	0.82	0.96	1.08	1.29	1.51	2.07
R (%)	99.77	99.73	99.69	99.63	99.57	99.41
Température (°C)	19.4	19.3	19.3	19.3	19.3	19.3
pH	6.53	6.50	6.52	6.52	6.50	6.53
Conductivité (µs/cm)	59500	59500	59400	59400	59500	59500

a. Effet de la concentration du Floculant sur la turbidité :

Nous avons testé au cours de notre étude L'influence de floculant effectués selon le protocole du Jar-test à dose constante de coagulant (sulfate d'alumine) et à dose variables d'adjuvant.

Le tracé des courbe expérimentaux de la variation de la turbidité après en fonction de la concentration du floculant et le pourcentage de réduction de la turbidité pour les divers

solutions de l'eau de différente concentration de B.C.I (0.1g/l ; 0.5 g/l ; 1 g/l et 2 g/l) et de même concentration de sel (38 g/l), a permis d'obtenir des courbes représenter dans la figure (III.19).



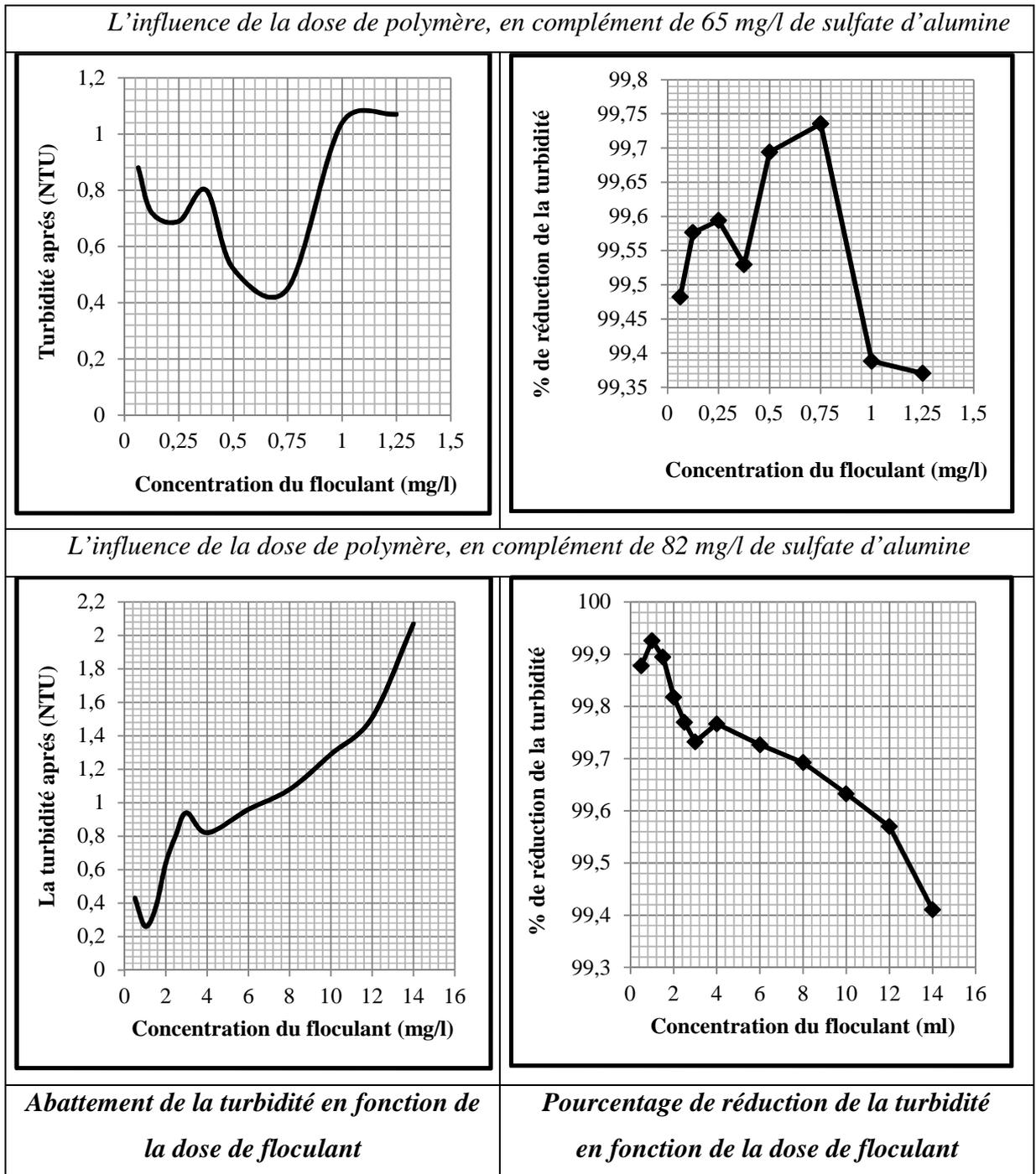


Figure III.19: L'influence de la dose du mélange (sulfate d'alumine/ polymère) sur la coagulation floculation.

Nous constatons que l'utilisation de floculant améliore nettement le rendement d'élimination de la turbidité pour les divers solutions de l'eau.

Avec l'ajout du floculant le pourcentage de réduction de la turbidité augmente et l'eau devient plus claire où les valeurs de la turbidité optimale diminuent.

Les floes formés sont importants et décantent rapidement contrairement à l'utilisation du sulfate d'alumine seul.

Pour 0.1 g/l de B.C.I :

D'après les résultats obtenus, la quantité de flocculant qui permet l'abattement de la turbidité est de 0.25 mg/l, au-delà de cette valeur une désorption se produit.

Pour cette dose, le rendement atteint pour réduire la turbidité est de 98.00%.

Pour 0.5 g/l de B.C.I :

La plus faible turbidité est de 0.39 NTU obtenu pour 0.75 mg/l de flocculant (un rendement de 99.31 %).

Pour 1 g/l de B.C.I :

Pour une quantité de 0.75 mg/l du polyamide nous avons remarqué que la valeur de la turbidité a atteint 0.45 NTU (un rendement de 99.74%).

Pour 2 g/l de B.C.I :

La plus faible turbidité est de 0.26 NTU obtenu pour une quantité de 1mg/l (un rendement de 99.93%).

Il est intéressant de noter qu'il y'a une amélioration observée (L'ajout de flocculant en parallèle avec le sulfate d'alumine) par rapport à l'utilisation de sulfate d'alumine seule. En prend le cas de 1 g/l de B.C.I :

Tableau III.18: La turbidité avec et sans flocculant pour 0.1 g/l de B.C.I.

	L'eau brute	Après décantation naturelle	Après ajout de coagulant	Après ajout de flocculant
La turbidité (NTU)	170	15.6	0.54	0.45
% de réduction de la turbidité	/	90.82	99.68	99.73

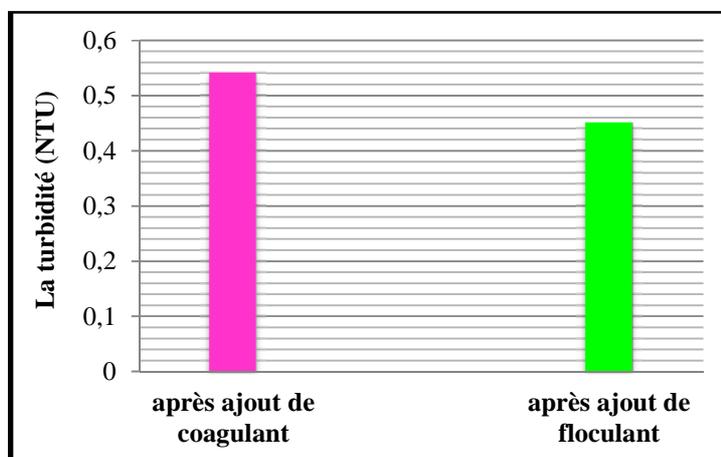


Figure III.20 : La turbidité avec et sans flocculant.

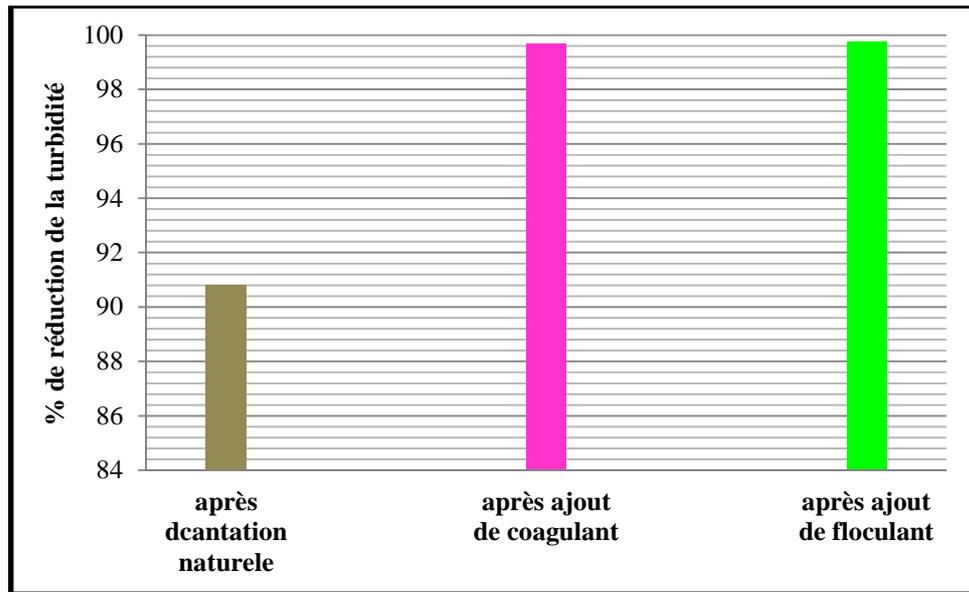


Figure III.21 : Le pourcentage de réduction de la turbidité avec et sans flocculant.

Alors, nous avons conclu que le meilleur pourcentage de réduction de la turbidité est obtenu par l’addition du coagulant avec le flocculant, plus la dose du coagulant et de l’adjuvant est bien déterminé, plus l’efficacité du traitement augmente. Donc il faut bien suivre et contrôler la turbidité pour éviter le phénomène de désorption, ainsi que le pH pour assurer les bonnes conditions de la coagulation floculation [102].

III.1.5.4. L’influence de la vitesse et durée d’agitation:

a. L’influence de la vitesse et de la durée d’agitation rapide durant la coagulation :

a.1. L’influence de la vitesse d’agitation rapide durant la coagulation :

L’étude de la turbidité en fonction de la vitesse a été réalisée en maintenant les paramètres suivants constants :

La dose optimale du coagulant $Al_2(SO_4)_3$, la dose optimale du flocculant anionique, temps de coagulation, la vitesse durant la floculation, la durée d’agitation durant la floculation, Temps de décantation et le volume de l’échantillon a traitée (1 litre).

Tableau III.19: Réduction de la turbidité pour différentes vitesses rapide durant la coagulation.

		Pour 1 g/l de B.C.I			
Vitesse d’agitation rapide (tr/min)		120	150	180	<u>200</u>
Phase de coagulation	Dose optimale de coagulant (mg/l)	65	65	65	<u>65</u>
	Temps d’agitation rapide (min)	2	2	2	<u>2</u>

Phase de floculation	Dose optimale de flocculant (mg/l)	0.75	0.75	0.75	<u>0.75</u>
	Vitesse d'agitation lente (tr/min)	30	30	30	<u>30</u>
	Temps d'agitation lente (min)	15	15	15	<u>15</u>
Phase de décantation	Temps de décantation (min)	20	20	20	<u>20</u>
La turbidité (NTU)	Avant	170	170	170	<u>170</u>
	Après	1.87	1.29	0.96	<u>0.54</u>
Pourcentage de réduction de la turbidité (%)		98.90	99.24	99.43	<u>99.73</u>
Le pH	Avant	7.85	7.85	7.85	<u>7.85</u>
	Après	7.11	7.11	7.11	<u>7.11</u>
La température (°C)	Avant	19.3	19.3	19.3	<u>19.3</u>
	Après	19.4	19.4	19.4	<u>19.4</u>
La conductivité (µs/cm)	Avant	57600	57600	57600	<u>57600</u>
	Après	58500	58500	58500	<u>58500</u>

a.2. L'influence de la durée d'agitation rapide durant la coagulation :

Une agitation rapide au cours de laquelle le réactif coagulant est introduit et dispersé. La vitesse de coagulation est de 200 tr/min. Les temps indiqués varient toutefois de 1 ; 2 ; 3 à 4 minutes.

Tableau III.20: Réduction de la turbidité pour différents temps d'agitation rapide durant la coagulation

Temps d'agitation rapide (min)		Pour 1 g/l de B.C.I			
		1	2	3	4
Phase de coagulation	Dose optimale de coagulant (mg/l)	65	<u>65</u>	65	65
	Vitesse d'agitation rapide (tr/min)	200	<u>200</u>	200	200
Phase de floculation	Dose optimale de flocculant (mg/l)	0.75	<u>0.75</u>	0.75	0.75
	Vitesse d'agitation lente (tr/min)	30	<u>30</u>	30	30
	Temps d'agitation lente (min)	15	<u>15</u>	15	15
Phase de décantation	Temps de décantation (min)	20	<u>20</u>	20	20
La turbidité(NTU)	Avant	170	<u>170</u>	170	170
	Après	0.93	<u>0.54</u>	0.63	0.79
Pourcentage de réduction de la turbidité (%)		99.45	<u>99.73</u>	99.62	99.53

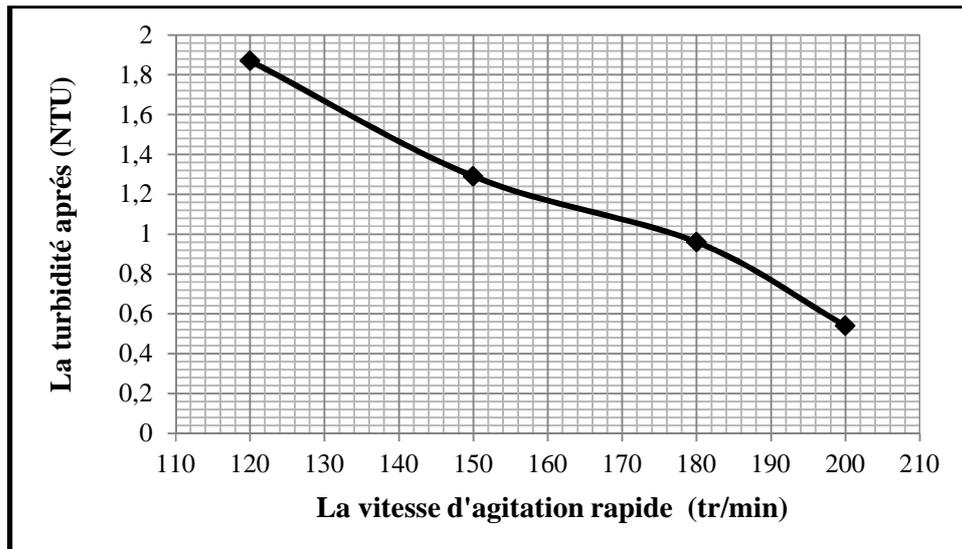


Figure III.22: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité après pour les différentes vitesses rapide durant la coagulation.

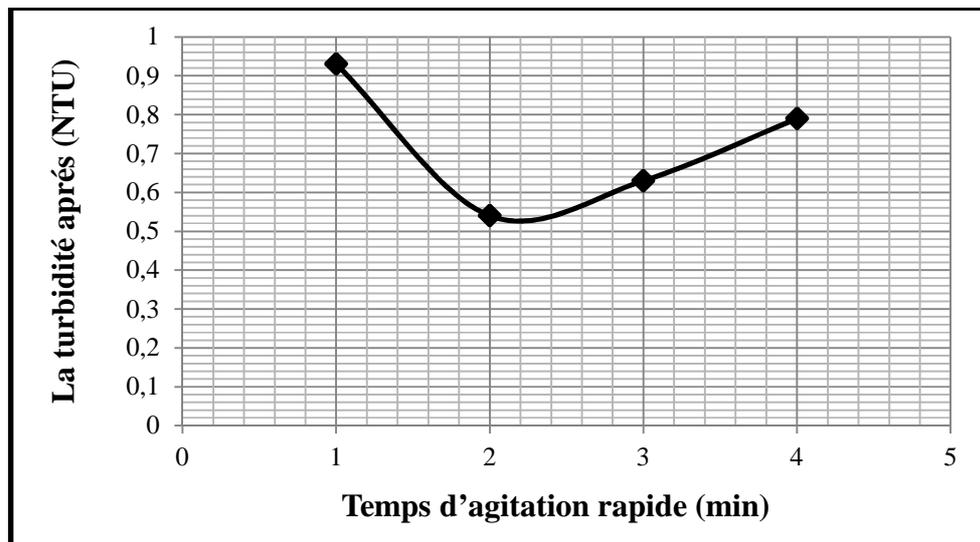


Figure III.23: Courbe expérimentale de la turbidité après en fonction du temps d'agitation rapide durant la coagulation.

Les figures (III.22 et III.23) mettent ainsi en évidence l'optimisation des paramètres d'agitation rapide en vue de l'abattement de la turbidité. La turbidité la plus faible est 0,54 NTU.

Le meilleur temps d'agitation rapide correspond à la plus faible turbidité est de 2 minutes.

Le processus de coagulation est très rapide, et il nécessite un temps très court pour la déstabilisation des colloïdes, en maintenant une agitation intense de 200 tr/min et un temps de coagulation de 2 min un degré de clarification de 99.68 % a été obtenu.

b. Vitesse et durée d'agitation lente durant la floculation :

Une fois les conditions optimales de la phase rapide sont fixées, on a effectué les mêmes opérations avec la phase lente pour optimiser la vitesse. Nous avons variés celle-ci en maintenant le temps d'agitation de 15min.

b.1. L'influence de la vitesse d'agitation lente durant la floculation :**Tableau III.21: Réduction de la turbidité pour différentes vitesses durant la floculation**

Vitesse d'agitation lente (tr/min)		Pour 1 g/l de B.C.I			
		20	<u>30</u>	45	60
Phase de coagulation	Dose optimale de coagulant (mg/l)	65	<u>65</u>	65	65
	Vitesse d'agitation rapide (tr/min)	200	<u>200</u>	200	200
	Temps d'agitation rapide (min)	2	<u>2</u>	2	2
Phase de floculation	Dose optimale de floculant (mg/l)	0.75	<u>0.75</u>	0.75	0.75
	Temps d'agitation lente (min)	15	<u>15</u>	15	15
Phase de décantation	Temps de décantation (min)	20	<u>20</u>	20	20
La turbidité (NTU)	Avant	170	<u>170</u>	170	170
	Après	1.76	<u>0.45</u>	0.53	0.69
Pourcentage de réduction de la turbidité (%)		99.55	<u>99.73</u>	99.69	99.59
Le pH	Avant	7.85	<u>7.85</u>	7.85	7.85
	Après	7.11	<u>7.11</u>	7.11	7.11
La température (°C)	Avant	19.3	<u>19.3</u>	19.3	19.31
	Après	19.4	<u>19.4</u>	19.4	19.4
La conductivité (µs/cm)	Avant	57600	<u>57600</u>	57600	57600
	Après	58500	<u>58500</u>	58500	58500

b.2. Optimisation du temps de floculation :**Tableau III.22: Réduction de la turbidité pour différents temps d'agitation lente durant la floculation**

Temps d'agitation lente (min)		Pour 1 g/l de B.C.I			
		10	<u>15</u>	17	20
Phase de coagulation	Dose optimale de coagulant (mg/l)	65	<u>65</u>	65	65
	Vitesse d'agitation rapide (tr/min)	200	<u>200</u>	200	200
	Temps d'agitation rapide (min)	2	<u>2</u>	2	2

Phase de floculation	Dose optimale de flocculant (mg/l)	0.75	<u>0.75</u>	0.75	0.75
	Vitesse d'agitation lente (tr/min)	30	<u>30</u>	30	30
Phase de décantation	Temps de décantation (min)	20	<u>20</u>	20	20
La turbidité(NTU)	Avant	170	<u>170</u>	170	170
	Après	0.99	<u>0.45</u>	0.53	0.78
Pourcentage de réduction de la turbidité (%)		99.42	<u>99.73</u>	99.69	99.54

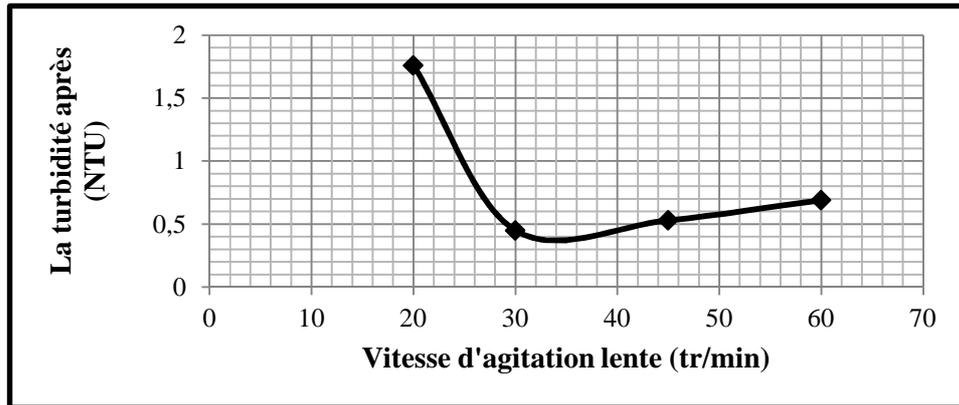


Figure III.24: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité après pour différentes vitesses lente durant la floculation.

La vitesse d'agitation lors de la floculation est essentielle. Lors de la coagulation, il est nécessaire d'avoir une forte agitation pour permettre le plus de rencontre entre les colloïdes et le coagulant mais pendant la floculation il faut modérer la vitesse. En effet, à cette étape, il se forme des floccs qui sont des agrégats de colloïdes. Le but étant d'augmenter au mieux leurs masses, une vitesse trop élevée risque de détruire ces floccs ; Il faut donc bien déterminer la vitesse optimale, c'est à dire, la vitesse pour laquelle les floccs sont les moins détruit par l'agitation. On constate que plus la vitesse augmente, plus l'aspect des floccs est mauvais.

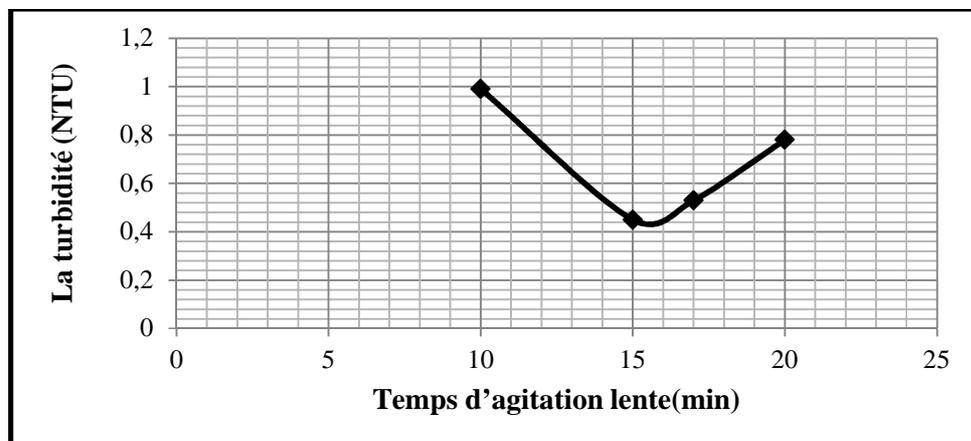


Figure III.25: Courbe expérimentale de la turbidité après en fonction du temps d'agitation lente durant la floculation.

Le temps d'agitation lent correspond à la plus faible turbidité ; est de 15 minutes.

La turbidité la plus faible est 0,45 pour le 2ème bécher. Les floes les plus gros sont observés également pour le 2ème bécher, avec une agitation lente de 30 tour/minutes.

Donc, pour une meilleure réduction de la turbidité, la vitesse lente optimale durant la floculation a été maintenue à 30 tr/min et cela durant un temps de 15 min.

❖ **L'influence de la vitesse d'agitation sur le pH et la conductivité pendant la phase de coagulation-floculation:**

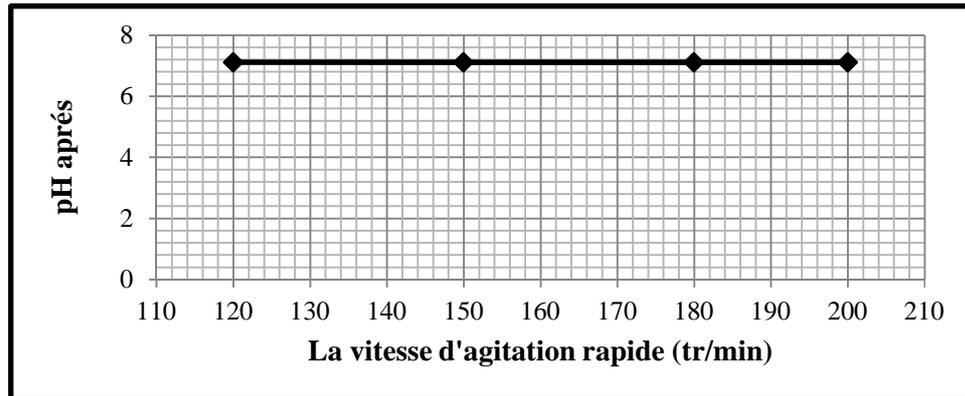


Figure III.26 : La variation du pH après en fonction de la vitesse d'agitation.

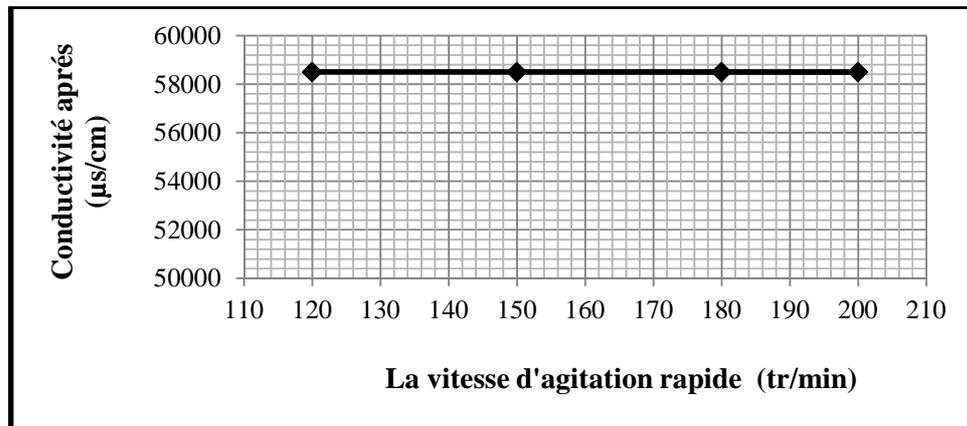


Figure III.27: La variation de la conductivité après en fonction de la vitesse d'agitation.

On ne remarque pas de modification pour la conductivité et le pH comme c'est affiché sur les figures (III. 26 et III.27).

Nous constatons sur les figures (III.26 et III.27) que le pH, la conductivité restent constants pour toutes les variations possibles de la vitesse d'agitation. Chose logique car il s'agit de la même solution et de la même concentration.

c. Détermination du temps optimal de la décantation :

La détermination de ces paramètres nous a permis de maximiser le degré de clarification des eaux après une étape de décantation.

Tableau III.23: Réduction de la turbidité pour différents temps de décantation

Temps de décantation (min)		Pour 1 g/l de B.C.I				
		10	15	20	<u>25</u>	30
Phase de coagulation	Dose optimale de coagulant (mg/l)	65	65	65	<u>65</u>	65
	Vitesse d'agitation rapide (tr/min)	200	200	200	<u>200</u>	200
	Temps d'agitation rapide (min)	2	2	2	<u>2</u>	2
Phase de floculation	Dose optimale de floculant (mg/l)	0.75	0.75	0.75	<u>0.75</u>	0.75
	Vitesse d'agitation lente (tr/min)	30	30	30	<u>30</u>	30
	Temps d'agitation lente (min)	15	15	15	<u>15</u>	15
La turbidité (NTU)	Avant	170	170	170	<u>170</u>	170
	Après	0.54	0.51	0.45	<u>0.38</u>	0.38
Pourcentage de réduction de la turbidité (%)		99.68	99.70	99.73	<u>99.78</u>	99.78

L'analyse du tableau (III.23) montre que l'efficacité et la fiabilité du traitement restent étroitement dépendantes du bon déroulement de la phase de décantation.

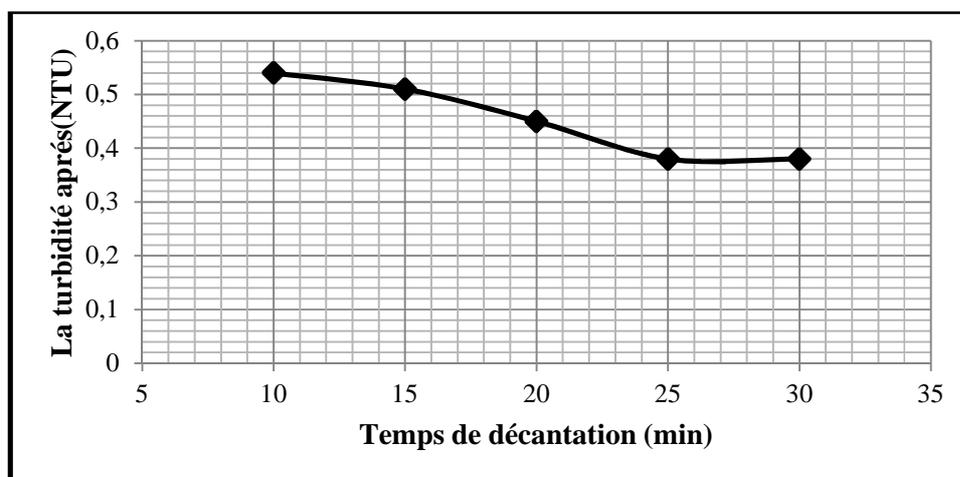


Figure III.28: Variation de la turbidité après en fonction du temps de décantation.

III.1.5.5. La variation de la dose optimum de coagulant / floculant en fonction de la qualité de l'eau brute.

On peut tracer la courbe de la variation de la dose optimale du coagulant en fonction de la concentration de B.C.I à parti de tableau suivant :

Tableau III.24: L'influence de la turbidité de l'eau sur la coagulation floculation

La concentration de B.C.I (g/l)	0.1	0.5	1	2	3
La dose optimale du coagulant (mg/l)	35	40	65	82	90

On peut tracer la courbe de la variation de la dose optimale du flocculant en fonction de la concentration de B.C.I à parti de tableau suivant :

Tableau III.25: L'influence de la turbidité de l'eau sur la coagulation floculation.

La concentration de B.C.I (g/l)	0.1	0.5	1	2
La dose optimale du flocculant (mg/l)	0.25	0.75	0.75	1

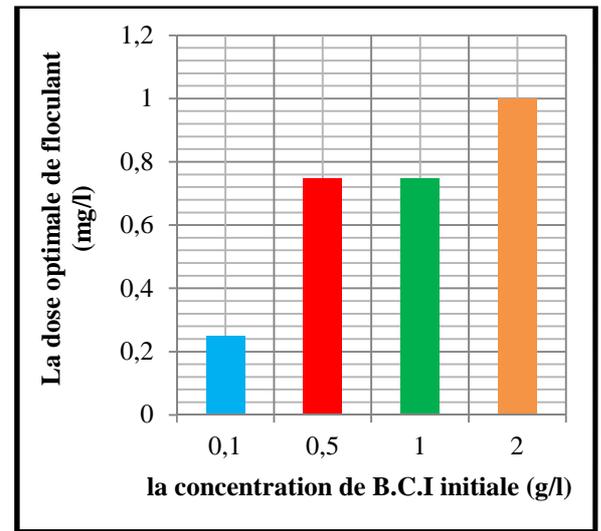
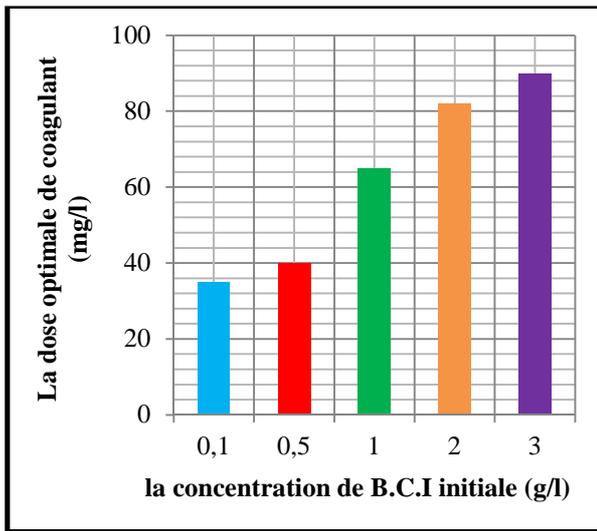


Figure III.29: Variation de la dose optimale de coagulant en fonction de la B.C.I

Figure III.30: Variation de la dose optimale du flocculant en fonction de B.C.I

Le procédé de coagulation-floculation avec l'utilisation de coagulant de sulfate d'alumine réalise un bon rendement d'élimination de la turbidité.

La dose optimale de coagulant varie selon la qualité de l'eau brute et la dose augmente avec l'augmentation de la turbidité ce qui exigerait un contrôle continu de cette qualité.

Nous pouvons conclure que la coagulation-floculation avec le sulfate d'alumine conduit à une meilleure élimination de la turbidité.

La figure (III.30) montre bien que plus la concentration de B.C.I augmente plus la concentration optimale de flocculant nécessaire pour faire diminuer la turbidité augmente.

III.1.5.6. Résultats expérimentaux d'application de la CFD sur le pilote:

Notre étude a été réalisée sur une solution salée et turbide ([Na Cl]=38g/l+1g/l de B.C.I).

La dose optimale de coagulant utilisée : 0.065g/l ; la concentration optimale de flocculant utilisée : 0.75 mg/l.

En mesurant l'influence d'un certain nombre de facteurs (type de décantation) sur la coagulation-floculation et décantation.

Tableau III.26: L'influence du type de décantation (pour un débit fixe =40l/h).

Le débit = 40l/h								
Type de décantation			Décantation lamellaire					
			Co-courant					
Turbidité (NTU)	Après	Après le temps de remplissage de décanteur (min)						
		240 min	245 min	250 min	255 min	260 min	265 min	270 min
		11.1	9.90	8.96	6.38	5.97	4.18	<u>3.97</u>
Température (°C)	Après	20.3	20.4	20.1	20.3	20.4	20.5	20.8
pH	Après	7.06	7.03	7.03	7.04	7.02	7.05	7.07
Conductivité (µs/cm)	Après	59100	59200	59100	59200	59400	59300	59200
Type de décantation			Décantation lamellaire					
			Contre-courant					
Turbidité (NTU)	Après	Après le temps de remplissage de décanteur (min)						
		240 min	245 min	250 min	255 min	260 min	265 min	270 Min
		44.1	36.5	28.5	13.3	10.2	8.63	<u>5.32</u>
Température (°C)	Après	20.5	20.3	20.3	20.5	20.4	20.7	20.8
pH	Après	7.02	7.02	7.03	7.03	7.05	7.07	7.07
Conductivité (µs/cm)	Après	59600	59200	59200	59600	59400	59700	59800
Type de décantation			Décantation classique					
			Après le temps de remplissage de décanteur (min)					
Turbidité (NTU)	Après	240 min	245 min	250 min	255 min	260 min	265 min	270 Min
		56.3	50.4	41.4	35.7	28.2	15.6	<u>8.09</u>
		Température (°C)	Après	20.2	20.5	20.6	20.5	20.4
pH	Après	7.02	7.04	7.07	7.03	7.05	7.07	7.07
Conductivité (µs/cm)	Après	59100	59600	59700	59600	59400	59700	59800

Tableau III.27: Evolution des paramètres physico-chimique en fonction du débit pour un seul type de décantation (Co-courant)

Le débit = Type de décantation		Les paramètres physico-chimiques							
		Turbidité (NTU)		Température (°C)		pH		Conductivité (µs/cm)	
		Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Décantation lamellaire	Co-courant	170	5.71	20.1	20.8	7.81	7.07	57900	59200
		Les paramètres physico-chimiques							
Le débit = Type de décantation		Les paramètres physico-chimiques							
		Turbidité (NTU)		Température (°C)		pH		Conductivité (µs/cm)	
		Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Décantation lamellaire	Co-courant	170	4.96	20.1	20.8	7.81	7.07	57900	59200
		Les paramètres physico-chimiques							
Le débit = Type de décantation		Les paramètres physico-chimiques							
		Turbidité (NTU)		Température (°C)		pH		Conductivité (µs/cm)	
		Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Décantation Lamellaire	Co-courant	170	3.97	20.1	20.8	7.81	7.07	57900	59200

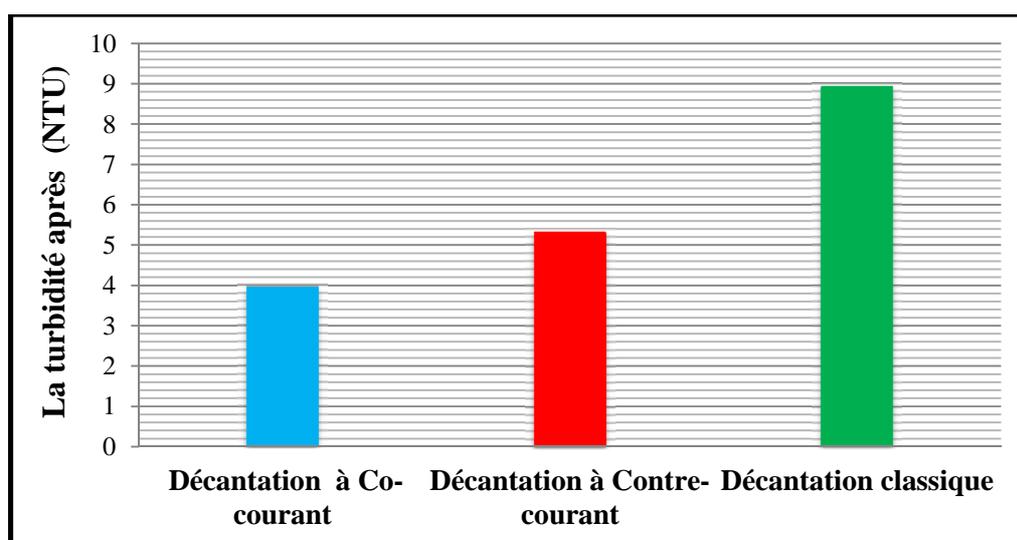


Figure III.31: Variation de la turbidité en fonction du type de décantation pour un débit donné.

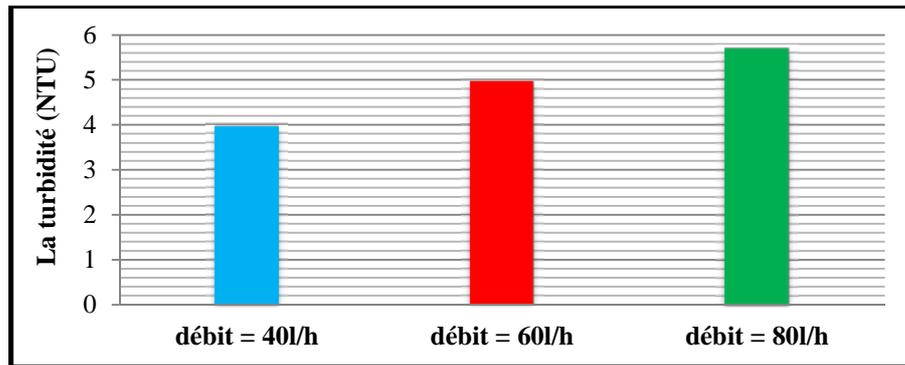


Figure III.32: Variation de la turbidité en fonction du débi (décantation à Co-courant).

Les résultats que nous avons trouvés nous permettent de tirer les remarques suivantes:

- Le débit influe sur le rendement de la décantation de telle façon que l'augmentation de ce dernier cause la diminution du temps de séjour et par la suite la diminution du rendement:
- En augmentant le débit, la vitesse d'écoulement augmente ce qui rend impossible la décantation des particules fines.

En principe, la concentration des MES à l'entrée du décanteur est constante vu que le bac de sédimentation est alimenté à partir de la même eau chargée. Mais dans notre expérience, on a constaté qu'il y'a eu des perturbations de quelques valeurs à cause de :

- Les agitations utilisées n'ont pas permis l'obtention d'un mélange uniforme.
- Des perturbations du débit réglé au début de chaque essai ont été constatées le long des expériences.

En effectuant l'expérience (pour différent débit : $Q= 60$ et 80 l/h), on peut dire qu'il y a un certain nombre de particules qui ne peuvent pas se décanter et, donc pour arrêter ou diminuer au maximum ces particules, nous avons réalisé une expérience pour un débit $Q=40$ l/h. L'utilisation de faible débit permet l'augmentation de pourcentage de réduction de la turbidité et amélioration de la décantation des particules très fines dans le décanteur.

Pour cela, on a effectué plusieurs essais, en gardant le débit constant ($Q=40$ l/h) pour chaque essai, on a prélevé des échantillons à l'entrée et à la sortie pour chaque type de décantation et chaque temps.

En observant les résultats de tableau (III.26), on peut remarquer principalement que l'installation d'un ensemble de lamelle à l'intérieur d'un décanteur permet une nette amélioration du rendement.

Pour déterminer la position idéale de ces lamelles c-à-d la position qui correspond à un rendement max, nous avons mené des expériences en installant à différentes positions. Cela nous a permis de tirer les constatations suivantes:

En observant la variation du rendement en fonction de la position de la chicane, on remarque que ce rendement est très important aux positions Co- courant.

L'effet des lamelles a été évalué à l'aide des mesures de la turbidité. Ces mesures montrent que les lamelles réduisent considérablement la turbidité. En effet. La turbidité avant les lamelles s'élevait à 170 NTU alors qu'à leurs sorties elle n'était plus que 3.97 NTU.

Tout cela pour une concentration de 1g/l de B.C.I et de 38 g/l de sel, la figure (III.31) montre bien que la décantation lamellaire est plus efficace que celle classique et que même dans la décantation lamellaire, la décantation Co-courant est la meilleure.

Nous constatons que la valeur obtenue de la turbidité après coagulation-floculation pour chaque type de décantation dans le pilote est plus grande que celle obtenu en Jar-Test, malgré l'utilisation des doses optimales des réactifs. Le défaut se cache entre plusieurs paramètres tels que :

- la circulation de l'eau ;
- le type de la vitesse d'agitation ;
- le mélange ;
- la forme du décanteur ;
- le temps de décantation ;
- et la présence de lamelles.

Premièrement, les intensités de mélange en bécher et en pilote sont différentes. En bécher, cette intensité est constante afin de maintenir en suspension les floes lestés.

En bécher, la décantation est statique. Aucun courant ou mouvement de l'eau n'est simulé, l'eau est à l'abri de la lumière, le volume de bécher est constante (1litre), le système de prélèvement de l'eau décantée est situé à 7 cm sous la surface de l'eau.

La figure (III.33) représente les différents types de décantation :

Avec :

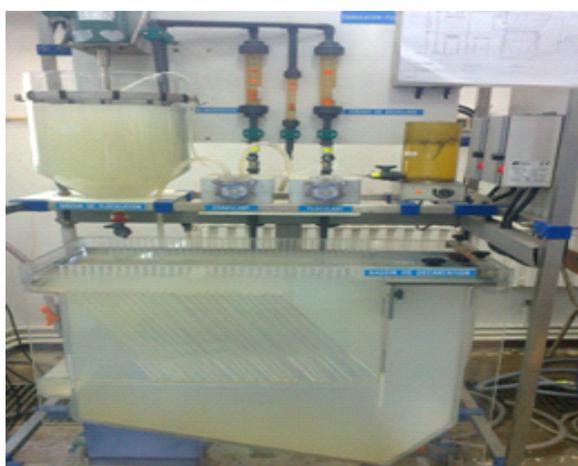
- (a) : La décantation classique (avant) ;
- (b) : La décantation classique (après) ;
- (c) : La décantation lamellaire co-courant (avant) ;
- (d) : La décantation lamellaire co-courant (après) ;
- (e) : La décantation lamellaire contre-courant (avant) ;
- (f) : La décantation lamellaire contre-courant(après) ;



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figure III.33: L'influence de types de décantation.

III.6. Conclusion :

Notre étude pratique sur l'application de coagulation floculation décantation pour le prétraitement de l'eau salée turbide, nous a permis de faire les conclusions suivantes :

Les paramètres de clarification de l'eau que nous avons mesurée à l'échelle du laboratoire sont :

- ☞ La dose optimale du coagulant ;
- ☞ La dose optimale du floculant ;
- ☞ La vitesse et la durée d'agitations rapide pour l'étape de la coagulation ;
- ☞ La vitesse et la durée d'agitations lente pour l'étape de la floculation;
- ☞ Le temps de décantation ;

Les résultats des essais de coagulation-floculation selon le protocole de « Jar-Test » apportés au cours de cette étape font ressortir les conclusions suivantes :

- ☞ La détermination de la concentration du coagulant est un paramètre essentiel pour la déstabilisation des colloïdes.
- ☞ La coagulation-floculation avec une dose optimale du sulfate d'alumine comme coagulant conduit à une réduction de la turbidité.
- ☞ La dose optimale de coagulant varie selon la qualité de l'eau brute, elle augmente avec l'augmentation de la turbidité.

Dans un second temps, nous avons utilisé certains adjuvants. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ☞ L'influence des adjuvants sur la coagulation floculation s'avère très importante pour le jugement sur l'efficacité de l'abattement de la turbidité.
- ☞ L'utilisation d'adjuvants en parallèle avec le coagulant améliore R (%).
- ☞ L'aide coagulant (le polymère) à des faibles doses ; améliore la qualité des eaux traitées, et diminue le temps de décantation.
- ☞ L'injection d'adjuvants avec le sulfate d'alumine est nécessaire pour le traitement des eaux.
- ☞ Une surdose du polymère produit inévitablement une déstabilisation des particules colloïdales qui sont susceptibles de changer la charge de surface.
- ☞ Le temps d'agitation est un facteur important, qu'il faut prendre en compte, pour le bon déroulement du procédé de coagulation floculation.
- ☞ L'étape de coagulation nécessite une vitesse très rapide et un temps très court.

- ☞ L'étape de floculation nécessite une vitesse lente et un temps très lent,
- ☞ L'influence de la vitesse d'agitation n'existe que sur la turbidité de l'eau.
- ☞ Le pH est l'un des paramètres les plus importants qu'il faut noter, du fait qu'il joue un rôle déterminant dans la coagulation.
- ☞ Puisque la valeur du pH après est reliée aux concentrations injectées des produits de coagulation floculation, elle est toujours inférieure ou égal à la valeur initiale.
- ☞ Le pH diminue avec l'augmentation de la dose du sulfate d'alumine par contre la conductivité augmente.
- ☞ La valeur de la conductivité après coagulation-floculation est toujours supérieure à la valeur initiale car elle est reliée à la concentration injectée du produit de coagulation-floculation.
- ☞ la conductivité reste constante pour toutes les variations possibles de la vitesse d'agitation. Chose logique car il s'agit de la même solution et de la même concentration.
- ☞ la décantation lamellaire est plus efficace que celle classique et que même dans la décantation lamellaire, la décantation Co-courant est la meilleure (Le pilote TE600)
- ☞ L'influence de la décantation décroît respectivement par l'ordre suivant :
Lamellaire Co-courant, Contre-courant et enfin Classique.
- ☞ La coagulation floculation et décantation comme montre les résultats de l'étude est donc l'un des procédés fondamentaux de clarification pour le traitement des eaux.

III.2. Etude expérimentale de l'ultrafiltration:

III.2.1. Introduction:

La technologie vise le traitement par ultrafiltration d'une eau turbide pour l'élimination, sans ajout de produits chimique, de la turbidité et des micro-organismes pathogènes. Il s'agit d'une chaîne de traitement membranaire impliquant la mise en place de module de fibres creuses, rassemblés, opérés sous faible pression et placés pour améliorer la qualité d'eau brute à l'intérieur de la cuve d'alimentation [114].

III.2.2. La membrane d'ultrafiltration :

La membrane d'ultrafiltration est une membrane sous pression dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau (III.28).

Tableau III.28: Caractéristiques de la membrane d'ultrafiltration

Type de membrane	Membrane d'ultrafiltration	
Composition de la membrane	Polyacrylonitrile	
Corps de la cartouche d'UF	Polysulfone	
Seuil de coupure	10^{-4} à 10^{-6} m	
Module	Fibres creuses	
Type de procédé	Membrane sous pression à filtration tangentielle	
Orientation	Orientation verticale.	
Pression maximum d'alimentation	5 ou 6 bar	
Pression maximum dans le perméat	3 ou 4 bar	
PTM maximum	3 bar	
Diamètre	60 mm	
Longueur	550mm	
Surface de filtration	0.6m^2	

III.2.3. Résultats expérimentaux de l'étude du pilote:

- Les pressions sont réglées par les vannes de recirculation et de réglage du débit d'alimentation.
- La conductivité et la température sont contrôlées au cours de la manipulation.

Remarque :

Pour le bon fonctionnement du banc d'essais et pour avoir une grande diminution de la turbidité on utilise seulement une concentration de B.C.I correspond à 1g/l pour ne pas endommager la membrane d'UF, et éviter le problème de colmatage.

III.2.3.1. Etude de la rétention globale du module :

Tous cela pour une concentration de 38 g/l de NaCl et 1 g/l de B.C.I ↻ 170 NTU.

Manipulation N° 1 : Pour une pression d'entrée de 1.5 bar :

Température : $\{T_i = 22 \text{ °C} = 295.5 \text{ k} ; T_f = 25 \text{ °C} = 298.5 \text{ k}\}$.

Conductivité de la solution d'alimentation 57500 $\mu\text{s/cm}$.

Les résultats de cette manipulation sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.29: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (1.5bar)

Pression d'entrée (bar)	1.5						
Débit d'alimentation (l/h)	300	400	500	600	700	800	900
Débit perméat (l/h)	33	33	34	35	36	37	37
Pression perméat (bar)	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17
Pression concentrât (bar)	1.50	1.50	1.43	1.40	1.40	1.40	1.40

Tableau III.30: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 1.5 bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	300	400	500	600	700	800	900
Turbidité (NTU)	0.30	0.47	0.52	0.64	0.73	0.79	0.85
R (%)	99.82	99.72	99.69	99.62	99.57	99.53	99.50
Température (°C)	25	25	25	25.1	25.1	25.1	25.2
pH	7.47	7.50	7.53	7.60	7.64	7.70	7.75
Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	56000	55800	55700	55500	55400	55300	55300

Tableau III.31: Evolution des paramètres physicochimique de concentrât (Pour une pression d'entrée de 1.5 bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	300	400	500	600	700	800	900
Turbidité (NTU)	177	179	180	181	181	182	183
Température (°C)	24.9	25	25.1	25.1	25.1	25.2	25.3
pH	7.55	7.56	7.67	7.75	7.77	7.80	7.82
Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	55100	55400	55900	56000	56100	56200	56400

Manipulation N° 2 : Pour une pression d'entrée de 2 bar :

Température : $\{T_i = 20^\circ\text{C} = 293.5 \text{ K} ; T_f = 24^\circ\text{C} = 297.5 \text{ K}\}$.

Conductivité de la solution d'alimentation : $57500 \mu\text{s/cm}$.

Les résultats de cette manipulation sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.32 : Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (2 bar)

Pression d'entrée (bar)	2						
Débit d'alimentation (l/h)	300	400	500	600	700	800	900
Débit perméat (l/h)	49	49.5	50	51	52	53	53
Pression perméat (bar)	0.22	0.23	0.23	0.24	0.25	0.26	0.26
Pression concentrât (bar)	1.98	1.98	1.97	1.96	1.95	1.94	1.94

Tableau III.33: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 2 bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	300	400	500	600	700	800	900
Turbidité (NTU)	0.29	0.39	0.45	0.55	0.67	0.74	0.79
R (%)	99.83	99.77	99.73	99.68	99.60	99.56	99.54
Température (°C)	24.8	24.9	25	25.1	25.1	25.1	25.1
pH	7.64	7.67	7.69	7.70	7.73	7.74	7.75
Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	55200	54800	54700	54600	54500	54500	54400

Tableau III.34: Evolution des paramètres physicochimique de l'eau issus de la cuve de concentrât (pour une pression d'entrée de 2 bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	300	400	500	600	700	800	900
Turbidité (NTU)	180	181	182	183	184	185	185
Température (°C)	24.9	24.9	25.0	25.1	25.1	25.1	25.2
pH	7.83	7.84	7.85	7.86	7.90	7.91	7.92
Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	54700	55100	55700	55800	56000	56100	56200

Manipulation N° 3: Pour une pression d'entrée de 2.5 bar :

Température : { $T_i = 23^\circ\text{C} = 296.5\text{K}$; $T_f = 25^\circ\text{C} = 298.5\text{K}$ }.

Conductivité de la solution d'alimentation 57500 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Les résultats de cette manipulation sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.35: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (2.5 bar)

Pression d'entrée (bar)	2.5						
Débit d'alimentation (l/h)	400	500	600	700	800	900	1000
Débit perméat (l/h)	72	72	73	74	75	76	76
Pression perméat (bar)	0.29	0.29	0.3	0.3	0.31	0.31	0.31
Pression concentrât (bar)	2.5	2.5	2.45	2.45	2.4	2.4	2.3

Tableau III.36: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 2.5 bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Turbidité (NTU)	0.26	0.32	0.39	0.43	0.50	0.63	0.67
R (%)	99.85	99.81	99.77	99.75	99.70	99.63	99.61
Température ($^\circ\text{C}$)	24.9	24.9	25.1	25.1	25.2	25.2	25.3
pH	7.54	7.59	7.60	7.61	7.63	7.65	7.65
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	55100	55000	55000	54900	54600	54300	53900

Tableau III. 37: Evolution des paramètres physicochimique de l'eau issus de la cuve de concentrât (pour une pression d'entrée de 2.5 bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Turbidité (NTU)	177	180	183	185	187	188	190
Température ($^\circ\text{C}$)	25.1	25.2	25.2	25.3	25.3	25.3	25.4
pH	7.65	7.69	7.71	7.73	7.74	7.75	7.80
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	57500	57600	57800	57800	57900	57900	58100

Manipulation N° 4: Pour une pression d'entrée de 3 bar :

Température : $\{T_i = 23^\circ\text{C} = 296.5 \text{ K} ; T_f = 26^\circ\text{C} = 299.5 \text{ K}\}$.

Conductivité de la solution d'alimentation 57300 $\mu\text{s/cm}$.

Les résultats de cette manipulation sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.38: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (3 bar)

Pression d'entrée (bar)	3						
Débit d'alimentation (l/h)	400	500	600	700	800	900	1000
Débit perméat (l/h)	80	80.5	81	81.5	82	83	84
Pression perméat (bar)	0.17	0.18	0.20	0.21	0.22	0.23	0.23
Pression concentrât (bar)	3.00	2.98	2.98	2.97	2.95	2.94	2.91

Tableau III.39: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 3 bar).

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Turbidité (NTU)	<u>0.13</u>	0.16	0.18	0.19	0.26	0.30	0.36
R (%)	<u>99.92</u>	99.90	99.89	99.89	99.85	99.82	99.79
Température ($^\circ\text{C}$)	<u>24.9</u>	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5
pH	<u>7.69</u>	7.70	7.70	7.71	7.72	7.72	7.74
Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	<u>55000</u>	54900	54800	54600	54300	54000	53800

Tableau III.40: Evolution des paramètres physicochimique de l'eau issus de la cuve de concentrât (pour une pression d'entrée de 3bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Turbidité (NTU)	178	182	184	187	188	190	192
Température ($^\circ\text{C}$)	25.4	25.4	25.5	25.4	25.5	25.5	25.4
pH	7.77	7.79	7.80	7.82	7.86	7.88	7.93
Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	56800	56900	57000	57100	57200	57400	57200

Manipulation N° 5: Pour une pression d'entrée de 3.5bar :

Température : $\{T_i = 23^\circ\text{C} = 296.5 \text{ k} ; T_f = 26^\circ\text{C} = 299.5 \text{ k}\}$.

Conductivité de la solution d'alimentation 57000 $\mu\text{s/cm}$.

Les résultats de cette manipulation sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.41: Evolution du débit de perméat en fonction du débit d'alimentation à pression d'entrée donnée (3.5 bar)

Pression d'entrée (bar)	3.5						
Débit d'alimentation (l/h)	500	600	700	800	900	1000	1100
Débit perméat (l/h)	102	104	105	107	108	110	112
Pression perméat (bar)	0.09	0.09	0.1	0.1	0.6	0.63	0.7
Pression concentrât (bar)	3.5	3.45	3.45	3.4	3.4	3.32	3.30

Tableau III.42: Evolution des paramètres physicochimique de perméat (Pour une pression d'entrée de 3.5 bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Turbidité (NTU)	0.35	0.41	0.52	0.56	0.57	0.60	0.62
R (%)	99.79	99.76	99.69	99.67	99.66	99.65	99.64
Température ($^\circ\text{C}$)	25.2	25.3	25.3	25.5	25.6	25.7	25.7
pH	7.55	7.56	7.56	7.58	7.60	7.61	7.61
Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	54600	54500	54300	54100	54000	53900	53800

Tableau III.43: Evolution des paramètres physicochimique de l'eau issus de la cuve de concentrât (pour une pression d'entrée de 3.5 bar)

Les paramètres	Débit d'alimentation (l/h)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Turbidité (NTU)	155	157	160	162	166	172	174
Température ($^\circ\text{C}$)	25.6	25.6	25.6	25.7	25.8	25.9	26
pH	7.58	7.61	7.67	7.70	7.73	7.74	7.78
Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	55100	55200	55400	55700	55900	56000	56200

III.2.3.2. Paramètres de suivi des performances hydrauliques :

Le fonctionnement hydraulique des membranes est suivi par la mesure et l'enregistrement en continu de différents paramètres : les pressions (amont et aval des membranes), le débit de filtration et la température. Ces valeurs sont utilisées pour calculer les différents paramètres de fonctionnement comme le taux de conversion (Y):

Tableau III.44 : La variation du taux de conversion pour les différentes pressions.

	Q_p	Q_a	$Y = Q_p / Q_a$	R(%)
Manipulation N° 1 (Pour 1.5 bar)	33	300	0.110	99.82
	33	400	0.083	99.72
	34	500	0.068	99.69
	35	600	0.058	99.62
	36	700	0.051	99.57
	37	800	0.046	99.53
	37	900	0.041	99.50
Manipulation N° 2 (Pour 2 bar)	49	300	0.163	99.83
	49.5	400	0.124	99.77
	50	500	0.100	99.73
	51	600	0.085	99.68
	52	700	0.074	99.6
	53	800	0.066	99.56
	53	900	0.059	99.54
Manipulation N° 3 (Pour 2.5 bar)	72	400	0.18	99.85
	72	500	0.144	99.81
	73	600	0.122	99.77
	74	700	0.106	99.75
	75	800	0.094	99.70
	76	900	0.084	99.63
	76	1000	0.076	99.61
Manipulation N° 4 (Pour 3 bar)	80	400	0.180	99.92
	80.5	500	0.144	99.90
	81	600	0.122	99.89
	81.5	700	0.106	99.89
	82	800	0.094	99.85
	83	900	0.084	99.82
	84	1000	0.076	99.79
Manipulation N° 5 (Pour 3.5 bar)	102	500	0.204	99.79
	104	600	0.173	99.76
	105	700	0.15	99.69
	107	800	0.134	99.67
	108	900	0.12	99.66
	110	1000	0.11	99.65
	112	1100	0.102	99.64

III.2.4. Représentation graphiques et interprétation:

III.2.4.1. Effet de débit d'alimentation sur le débit de perméat :

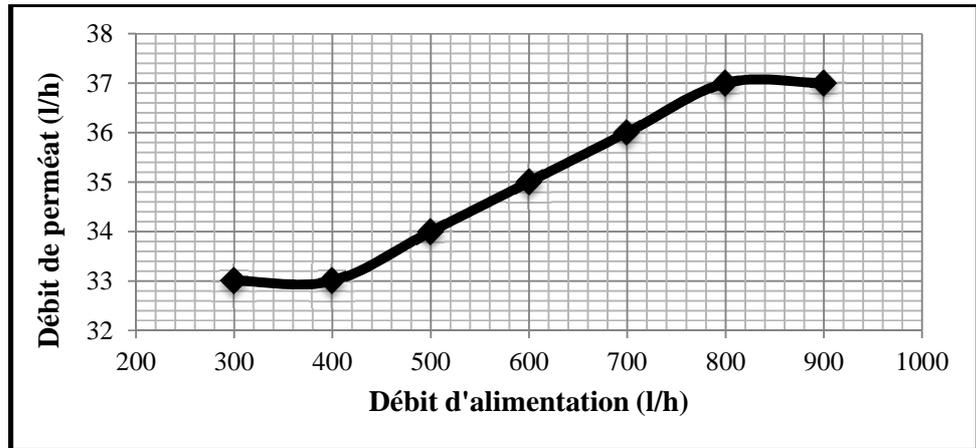


Figure III.34: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 1.5 bar).

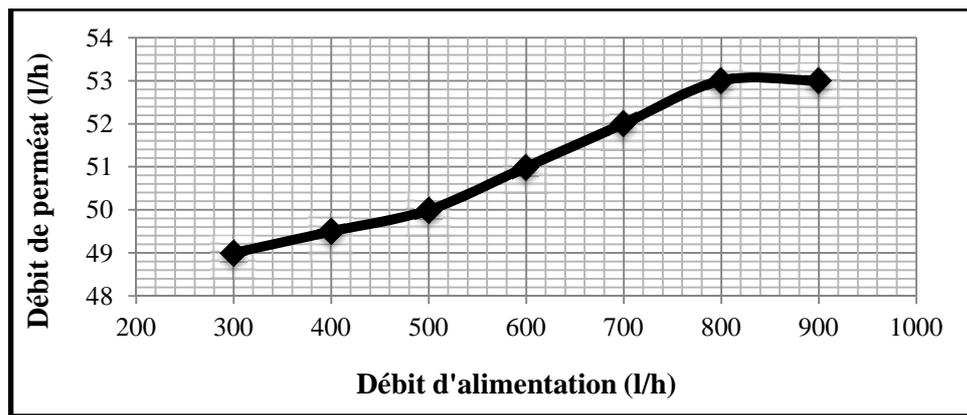


Figure III.35: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 2 bar).

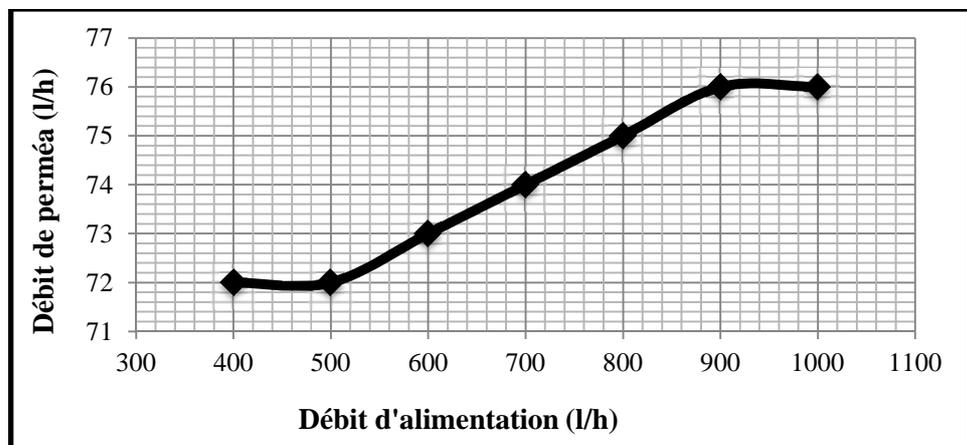


Figure III.36: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour (Pe = 2.5 bar).

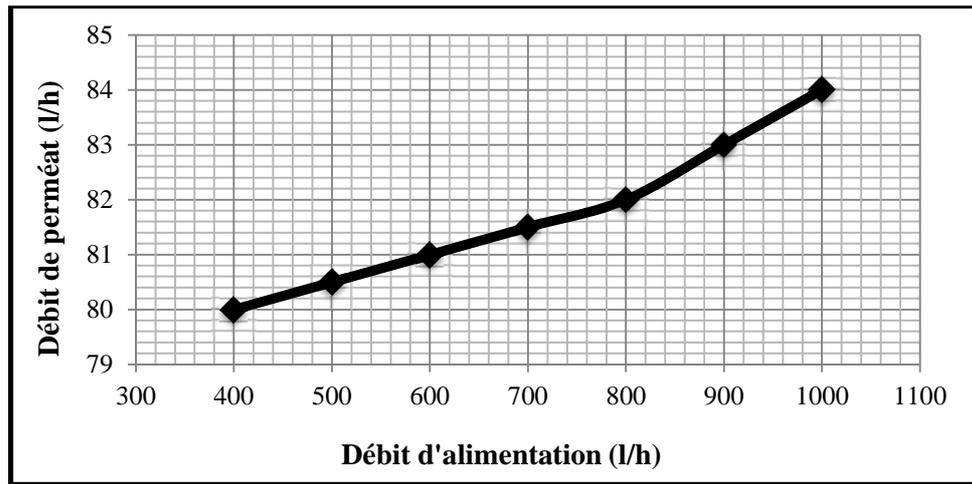


Figure III.37: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar).

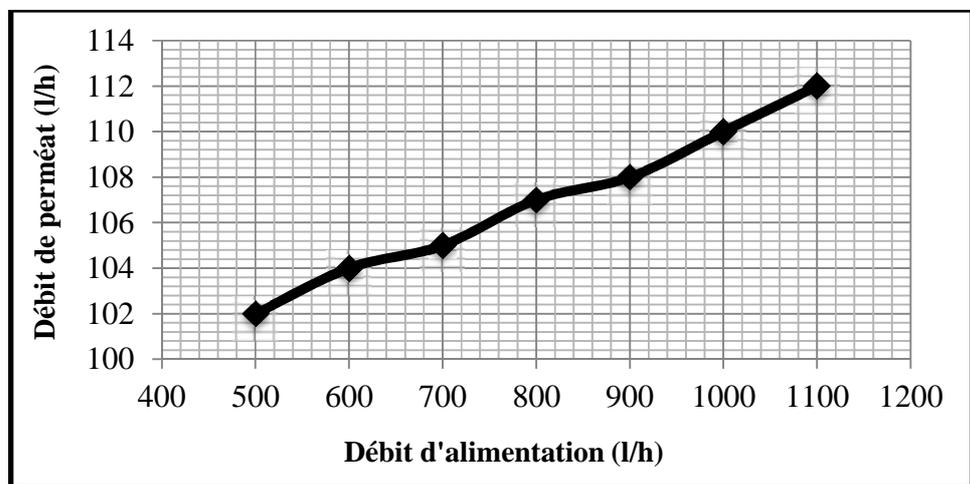


Figure III.38: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar).

La quantité et la qualité du débit de perméat est le principal paramètre qui détermine la performance d'une unité d'UF. Ce facteur est principalement influencé par les variables suivantes: pression, température, concentration en sel de l'eau alimentant le système.

D'après l'étude réalisée, lors de l'ultrafiltration de l'eau salée et turbide par une membrane en polysulfone, on observe que le débit de perméat augmente quand nous augmentons le débit de la solution d'alimentation.

Nous remarquons dans les figures (III.34, III.35, III.36, III.37, III.38) que la variation de débit de perméat en fonction de débit d'alimentation est une fonction croissante. Donc on peut dire que la variation pour ce paramètre est bien linéaire en fonction de débit d'alimentation.

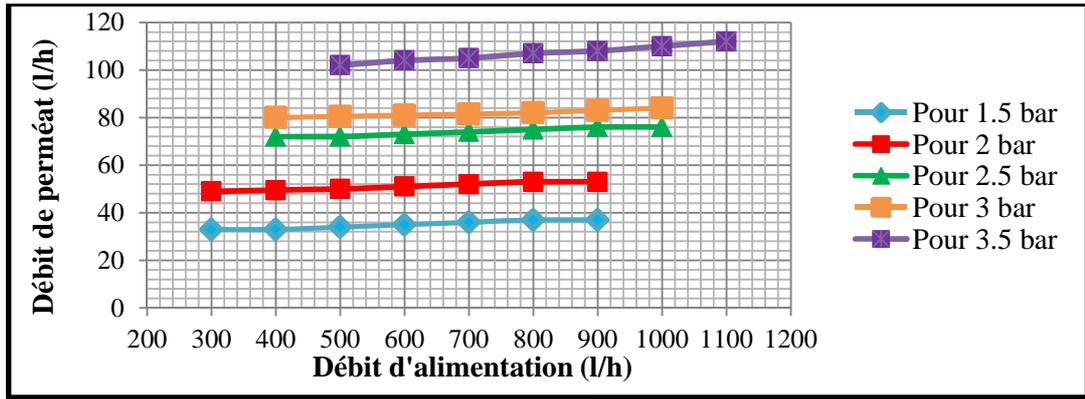


Figure III.39: Variation du débit de perméat en fonction de débit d'alimentation pour différentes pressions.

D'après la figure (III.39) nous observons une augmentation de débit de perméat au fur et à mesure que le débit d'alimentation augmente pour différentes pressions.

Nous constatons ici que Le débit de perméat de la courbe N°2 (pour 2 bar) est plus élevée que la courbe N°1 (pour 1.5 bar). En effet cette augmentation est due à l'augmentation de la pression d'alimentation. Plus la pression est grande plus le débit de perméat est grand.

III.2.4.2. Effet de débit d'alimentation sur la pression de perméat :

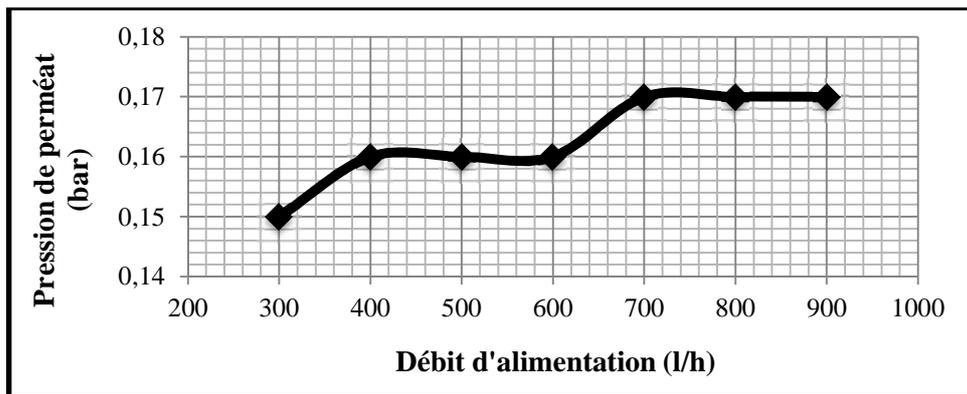


Figure III.40: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 1.5$ bar).

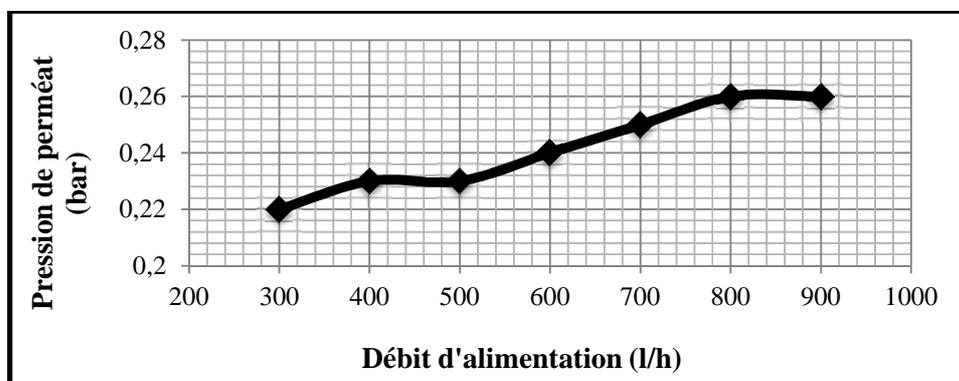


Figure III.41: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2$ bar).

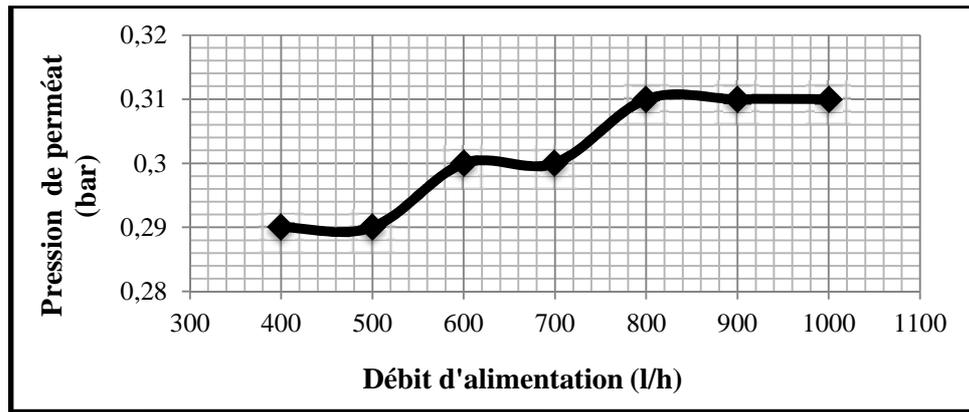


Figure III.42: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2.5$ bar).

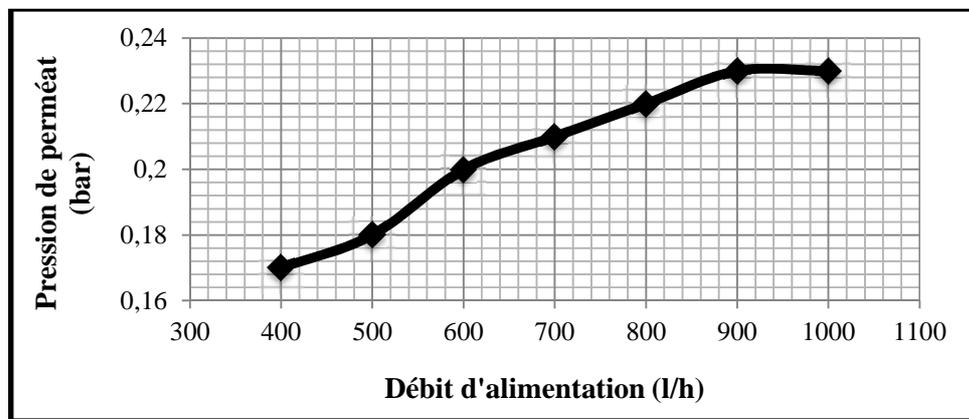


Figure III.43: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar).

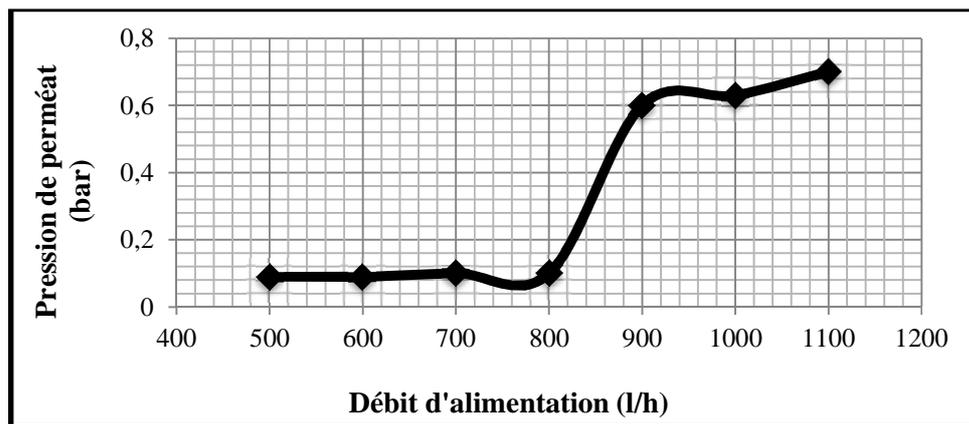


Figure III.44: Variation de la pression de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar).

La pression a un effet significatif sur la filtration membranaire. D'après les figures (III.40, III.41, III.42, III.43 et III.44), nous relevons que la pression de perméat augmente avec l'augmentation du débit d'alimentation pour les différentes pressions.

III.2.4.3. Effet de débit d'alimentation sur la pression de concentrât :

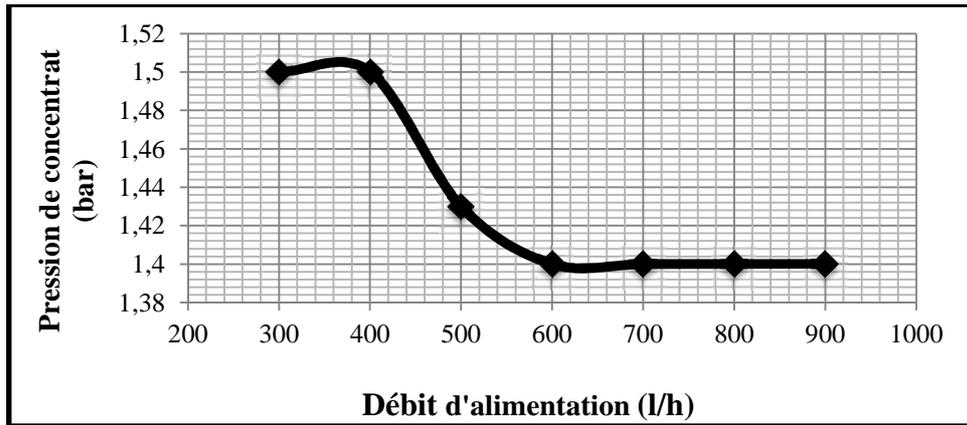


Figure III.45: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 1.5$ bar).

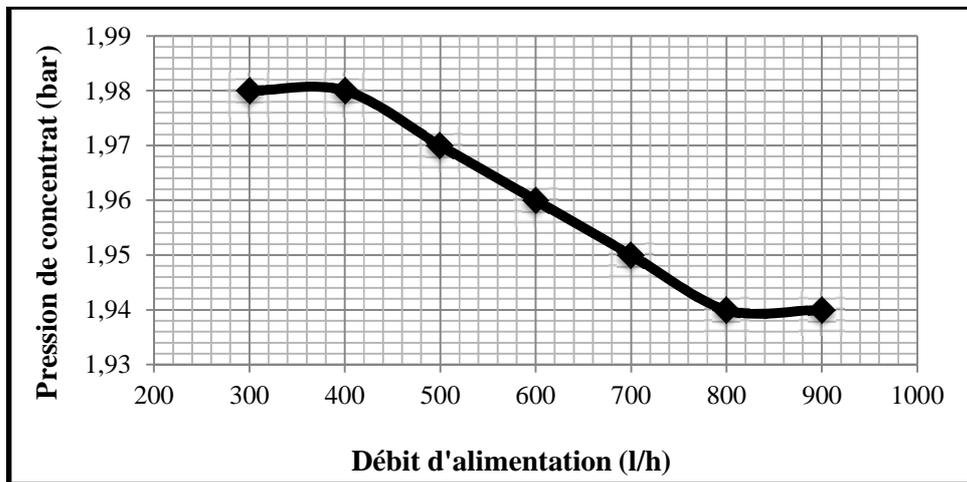


Figure III.46: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2$ bar).

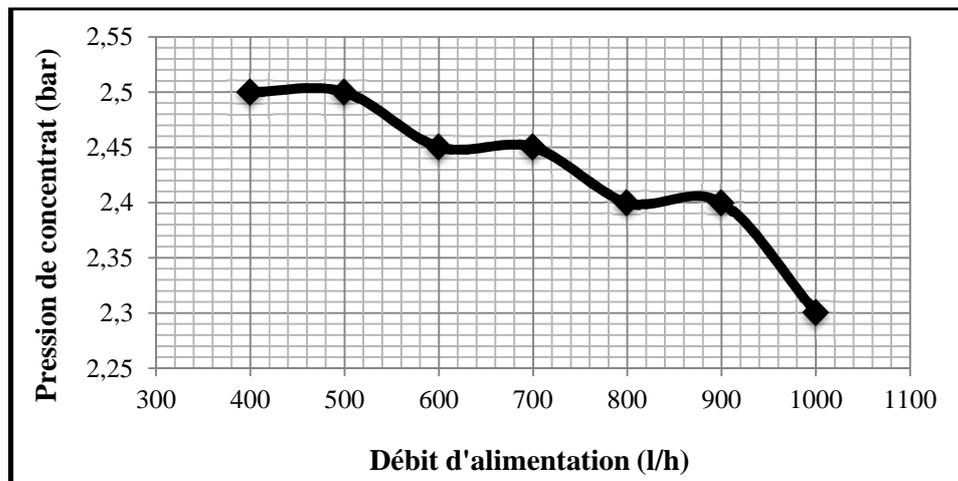


Figure III.47: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2.5$ bar).

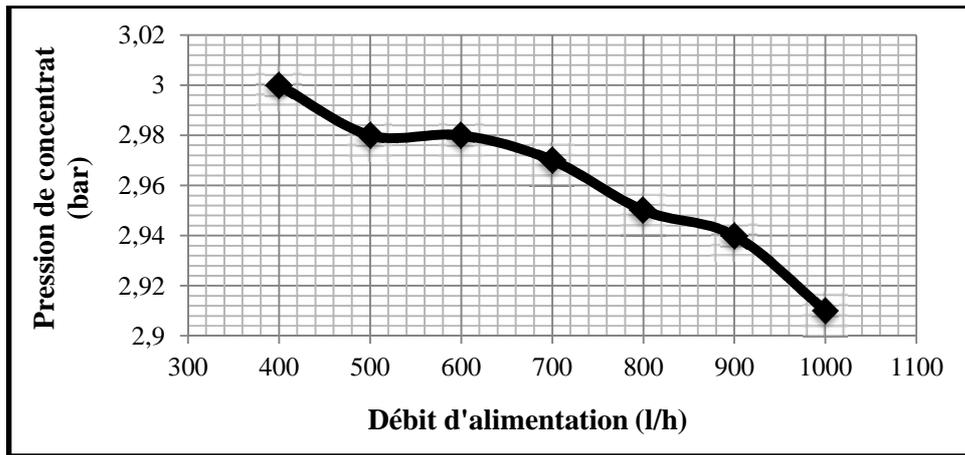


Figure III.48: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar).

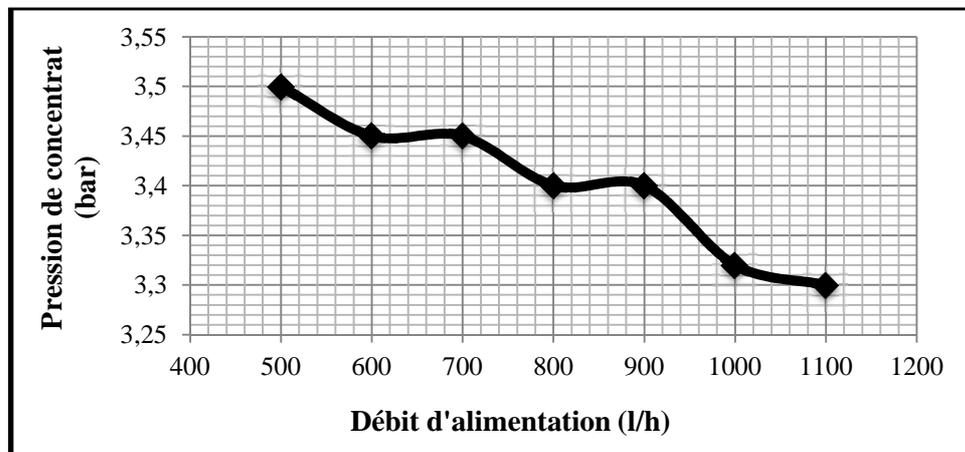


Figure III.49: Variation de la pression de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar).

D'après les figures (III.45, III.46, III.47, III.48 et III.49), nous observons une diminution de pression de concentrât au fur et à mesure que le débit d'alimentation augmente.

III.2.4.4. Effet de débit d'alimentation sur la turbidité de perméat :

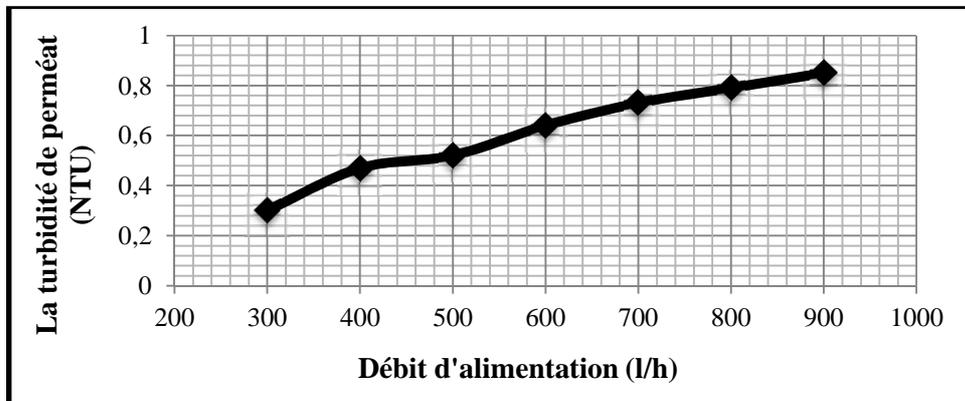


Figure III.50: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 1.5$ bar).

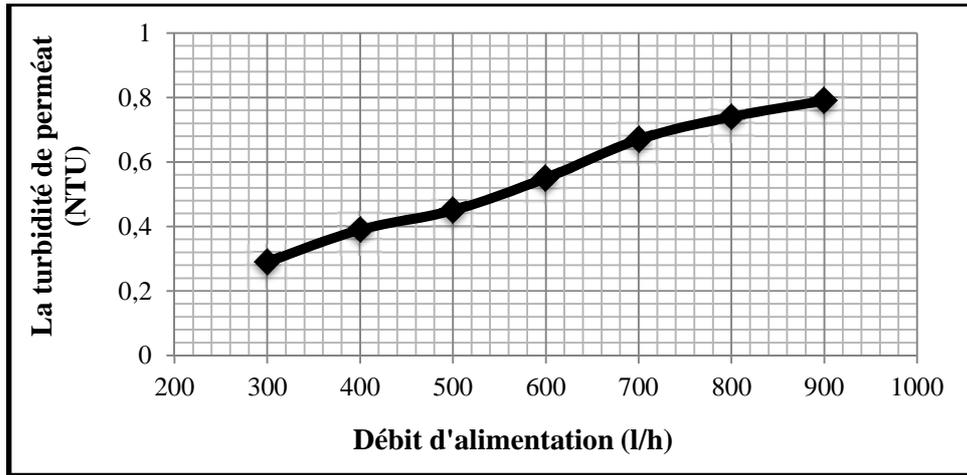


Figure III.51: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2$ bar).

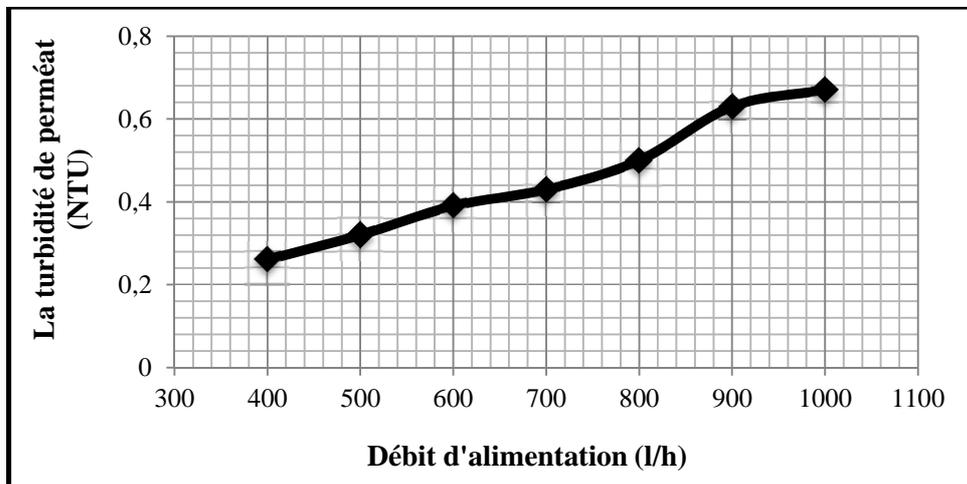


Figure III.52: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2.5$ bar).

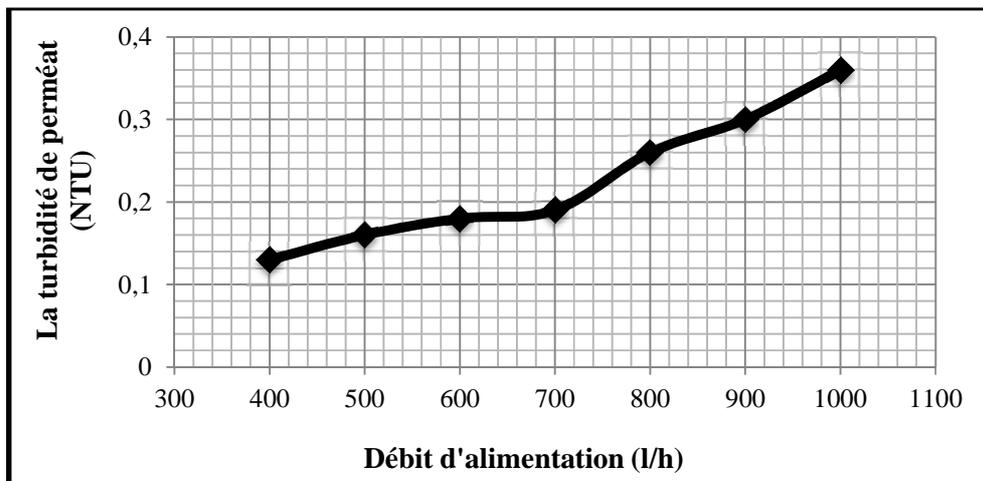


Figure III.53: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar).

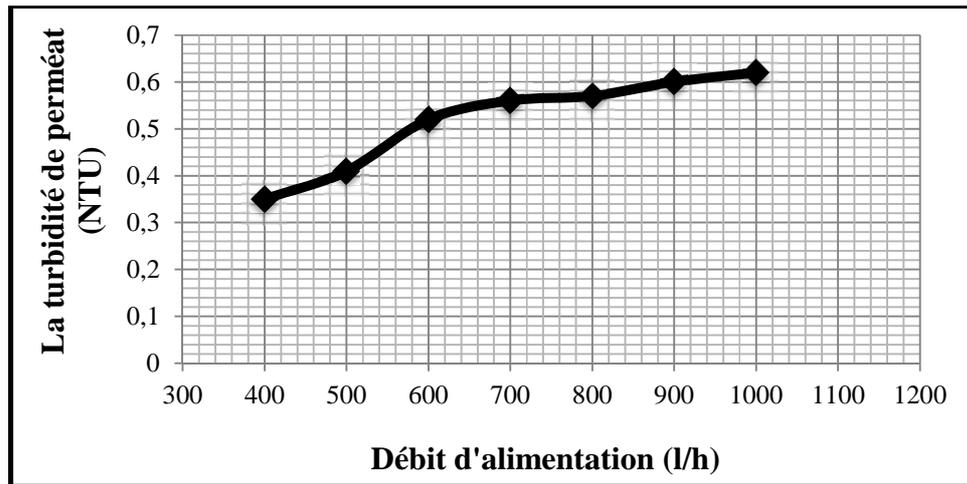


Figure III.54: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de perméat en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar).

Le paramètre de la turbidité est le paramètre le plus influencé par l'ultrafiltration et le plus important. Cette technique a prouvé une grande capacité d'amélioration de la qualité d'eau, ce qui est remarqué dans les figures (III.50, III.51, III.52, III.53 et III.54).

On constate d'après les résultats que la membrane d'ultrafiltration a une capacité de réduction de la turbidité d'une solution trouble (1 g/l de B.C.I), de 170 NTU jusqu'à 0.13 NTU (figure III.53).

La différence de la turbidité entre les deux étapes (avant et après UF) varie de façon remarquable.

On remarque que l'UF est efficace pour la réduction de la turbidité. Ce paramètre augmente avec l'augmentation de débit d'alimentation.

Tous ces résultats s'expliquent par le fait, que lorsque le débit augmente et les dimensions des pores du milieu filtrants deviennent plus petites à cause du colmatage croissant, la vitesse augmente à son tour et par conséquent l'écoulement de l'eau filtré devient turbulent. Cette turbulence provoque un détachement des particules retenues par le filtre est donc une turbidité plus élevée.

III.2.4.5. Effet de débit d'alimentation sur la turbidité de concentrât :

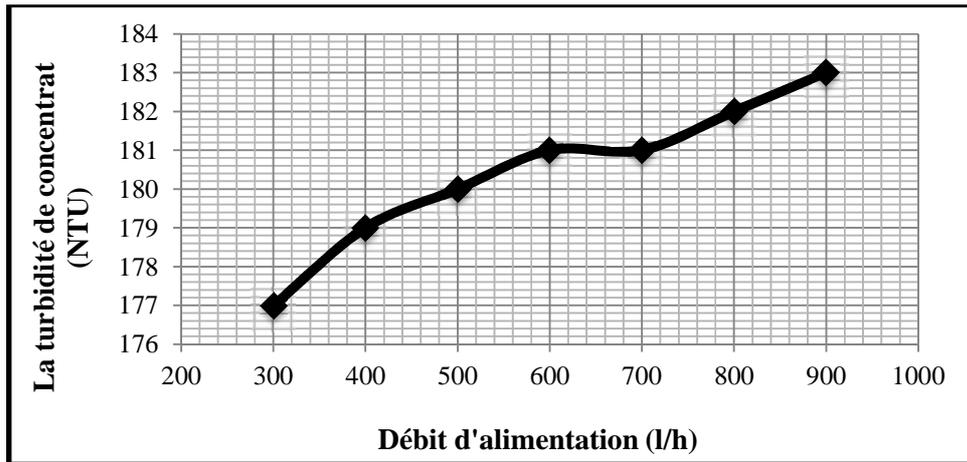


Figure III.55: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 1.5$ bar).

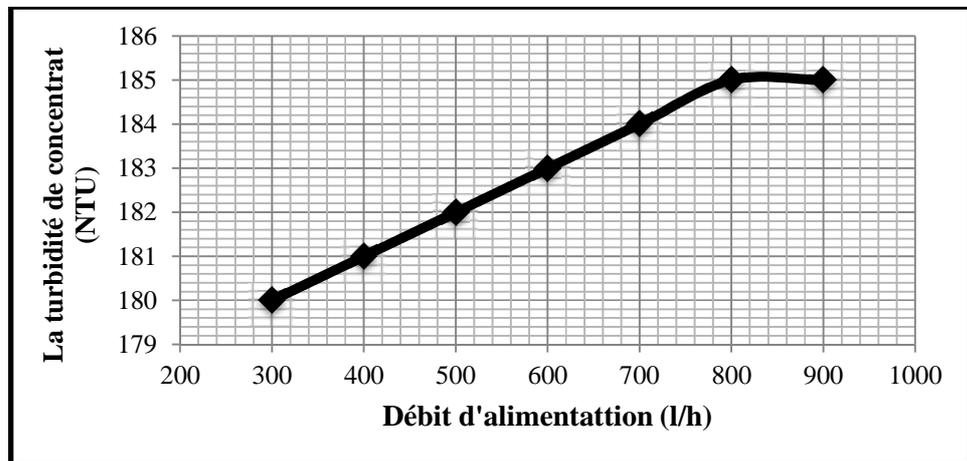


Figure III.56: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2$ bar).

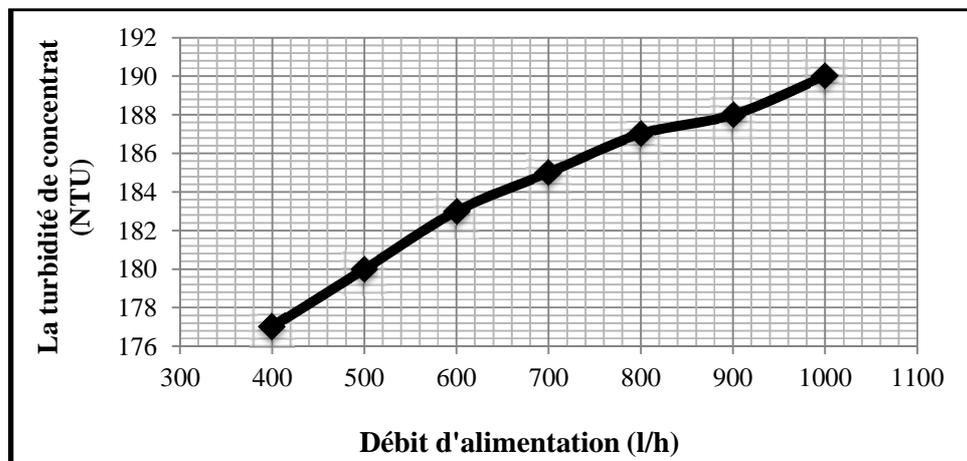


Figure III.57: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 2.5$ bar).

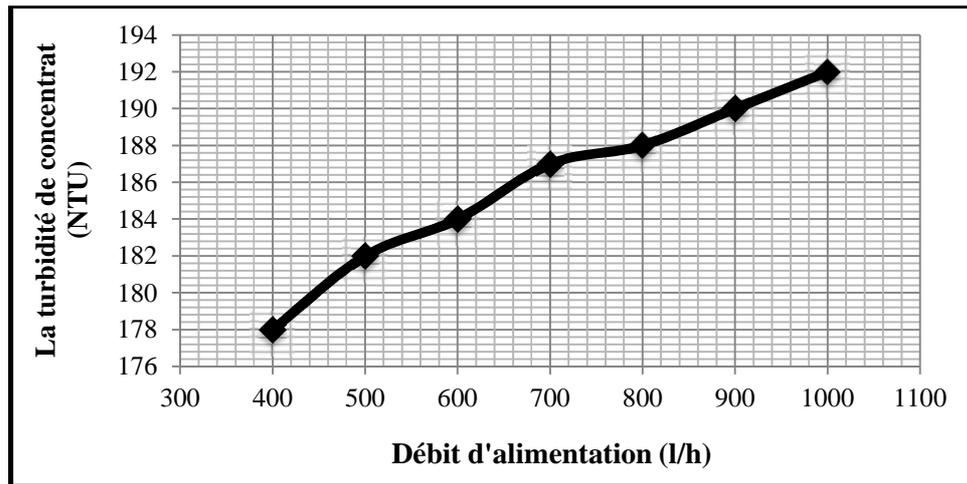


Figure III.58: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3$ bar).

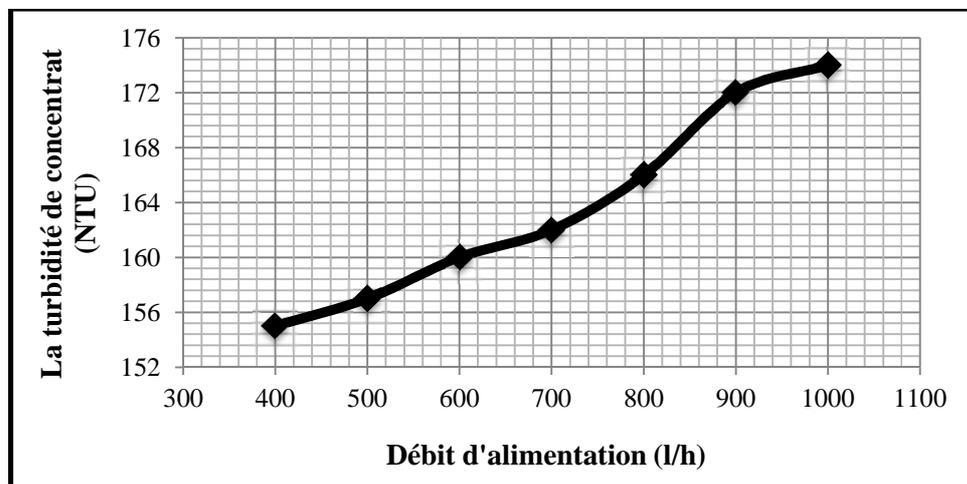


Figure III.59: Courbe expérimentale de la variation de la turbidité de concentrât en fonction de débit d'alimentation pour ($P_e = 3.5$ bar).

D'après les figures (III.55, III.56, III.57, III.58 et III.59), on peut constater que plus le débit d'alimentation augmente plus la turbidité du concentrât augmente.

La turbidité de concentrât est supérieure de la turbidité de solution trouble préparé pour toutes les variations possibles des débits d'alimentation. Chose logique car L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane. Une partie de la solution à traiter (débit d'alimentation) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes:

- ✓ une partie (débit Q_p) passe à travers la membrane : très bonne qualité de perméat (turbidité faible).
- ✓ une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrât) et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane (turbidité élevée).

III.2.5. Détermination des conditions optimales d'un procédé d'ultrafiltration :

Optimiser un procédé d'ultrafiltration tangentielle, c'est-à-dire l'optimisation des conditions opératoires. Le but est d'avoir la meilleure filtration possible, c'est-à-dire La turbidité la plus faible.

On peut dire que plus la turbidité avant l'ultrafiltration est importante plus en a intérêt à faire la filtration avec un débit faible, l'utilisation d'un débit fort devient inutile. Donc il faut trouver la valeur du débit optimum pour chaque turbidité afin d'obtenir la qualité désirée ou bien de l'améliorer.

Le débit optimal est donc de 400 L/h. La réduction de turbidité et l'obtention d'une eau de faible turbidité (0.13NTU) se fait sentir à partir de 3 bar de pression donc la pression optimal choisit est de 3 bar.

III.2.6. Variation des différents paramètres :**III.2.6.1. Le pH :**

La solution préparée est toujours basique à cause de la quantité de B.C.I ajouté (1g/l).

Après l'ultrafiltration, on remarque une petite variation de pH qui revient aux quelques particules de B.C.I bloquée dans les pores de membranes.

Les valeurs de pH dans les deux étapes (avant et après ultrafiltration) sont dans la même classe, comme exemple (dans la pression égale 3bar) le pH= 7.85 de la solution d'alimentation (avant) et 7.69 après ultrafiltration (de perméat).

III.2.6.2. La conductivité:

Dans les valeurs trouvées dans l'expérimentation on constate que dans tous les essais effectués, la variation de la conductivité est petite.

Dans l'étude de la conductivité pour la technique d'UF, il y a un changement (faible diminution) de la conductivité dans le perméat para port à la conductivité de l'eau d'alimentation, donc pour cette raison que l'UF n'est pas utilisable dans les techniques de dessalement car elle donne une qualité d'eau saline.

III.2.6.3. La température:

Ce dernier paramètre étudié à montrer que l'ultrafiltration dégage une chaleur et elle est due au passage d'eau et de soluté à travers la membrane.

L'augmentation de la température de la solution à traiter conduit généralement à une augmentation de débit de perméat à cause de la diminution de la viscosité.

III.2.7. La variation du taux de conversion :

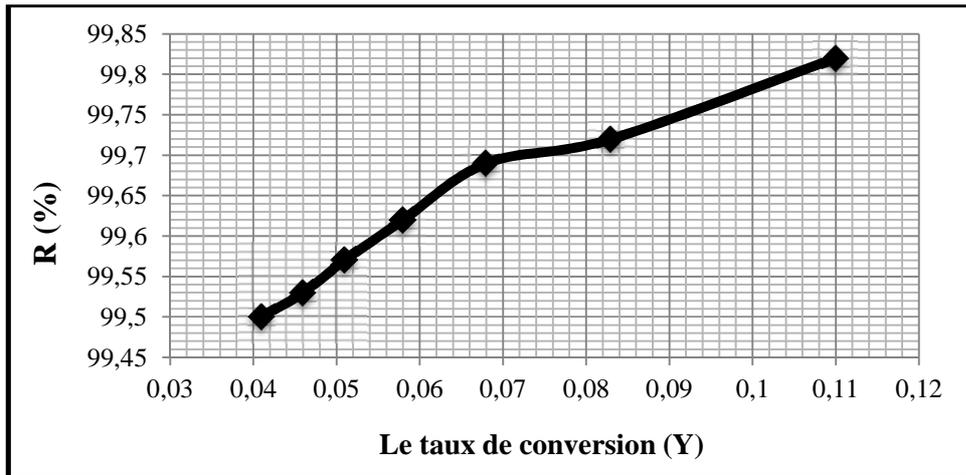


Figure III.60: Variation de taux de conversion en fonction de rendement (pour 1.5bar).

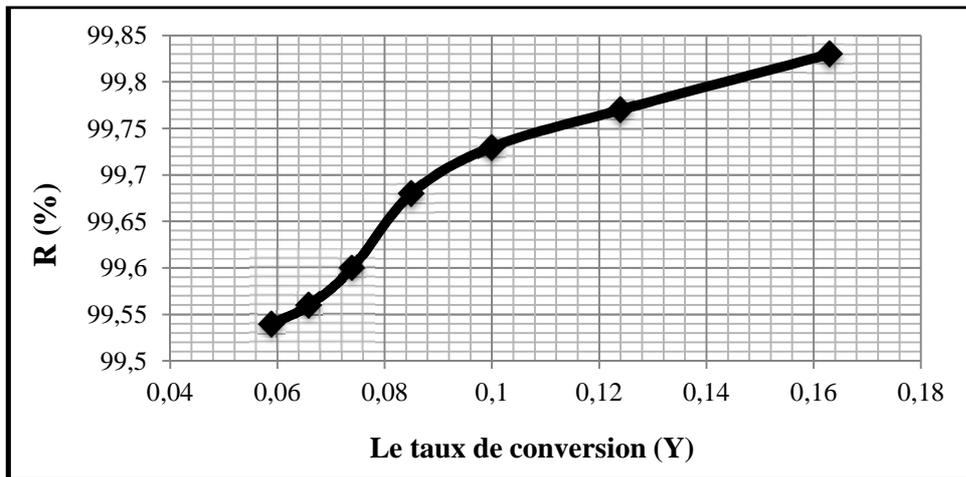


Figure III.61: Variation de taux de conversion en fonction de rendement (pour 2 bar).

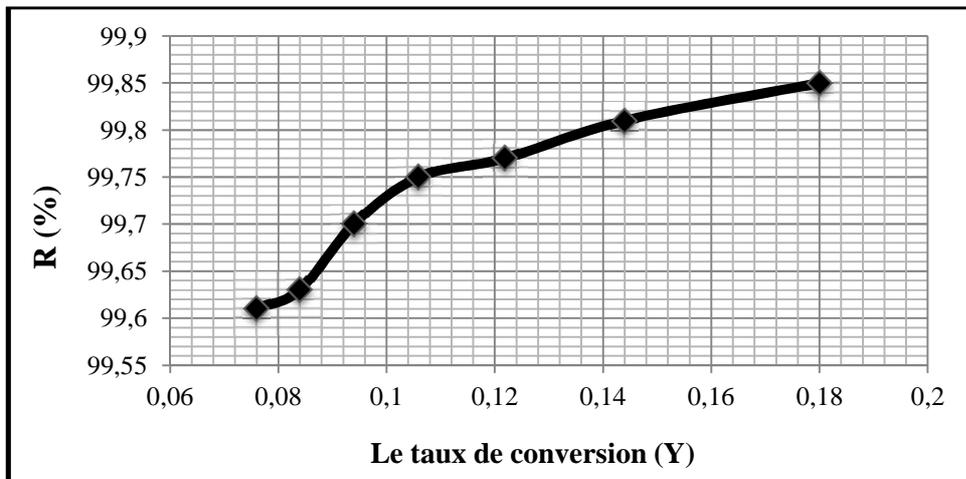


Figure III.62: Variation de taux de conversion en fonction de rendement (pour 2.5bar).

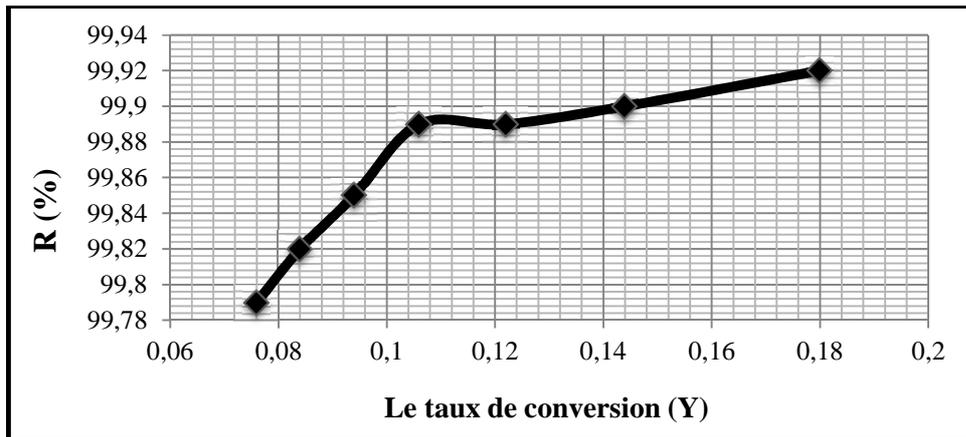


Figure III.63: Variation de taux de conversion en fonction de rendement (pour 3 bar).

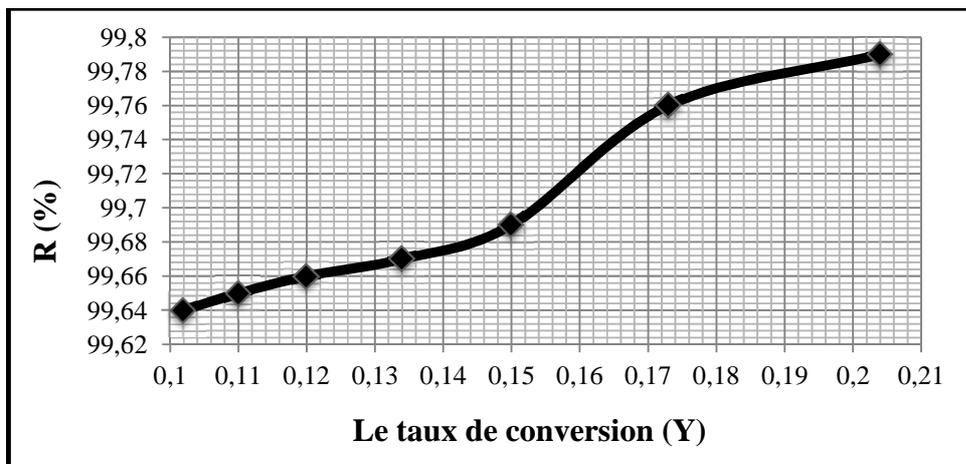


Figure III.64: Variation de taux de conversion en fonction de rendement (pour 3.5bar).

D'après les figures (III.60, III.61, III.62, III.63 et III.64) on remarque lorsque le taux de conversion augmente le rendement augmente.

III.2.8. Conclusion :

L'ensemble des résultats obtenus sur une période de suivi de la qualité des eaux à traiter par le pilote d'UF (TE300) permet de mettre en évidence les points suivants :

- ☞ Le débit de perméat augmente avec l'augmentation de débit d'alimentation.
- ☞ La grande influence de l'UF était remarquée dans le paramètre de la turbidité dont la différence des résultats avant et après l'UF est notable.
- ☞ L'UF est la méthode qui fonctionne en bonne voie avec des concentrations énormes.
- ☞ L'UF peut fonctionner en donnant une bonne qualité de l'eau traitée avec un temps minimale et un débit de perméat important.
- ☞ Pour favoriser cette objectif, nous avons conclues qu'il faut augmenter la pression appliquée à l'entrée du module, augmenter le débit d'alimentation et maintenir la température à une valeur ambiante.

III.3. Comparaison :

Le prétraitement conventionnel, largement utilisé sur les usines de dessalement actuellement en opération, est basé sur des séparations physico-chimiques (coagulation/floculation, décantation, filtration). Ce type de prétraitement peut aboutir à une variation de la qualité d'eau d'alimentation vers les membranes d'osmose inverse en cas de mauvaise qualité de l'eau brute, pendant des orages, ainsi qu'à une consommation de réactifs chimiques et une dépense énergétique relativement élevées. La coagulation floculation décantation, offre divers avantages [115]:

- ❖ L'utilisation de ce procédé chimique est très répandue, il y a donc beaucoup d'équipement déjà existant et une multitude d'agents chimiques disponibles;
- ❖ Les systèmes de coagulation-floculation chimique sont généralement automatisés et demandent donc peu de surveillance et d'entretien. Une main-d'œuvre hautement qualifiée n'est souvent pas nécessaire;
- ❖ Les coûts d'installation sont moins importants;

Mais :

- ❖ Puisqu'il y a plusieurs réactions en compétition dans ce type de système chimique et plusieurs degrés d'alcalinité en plus des autres facteurs influençant le procédé, il est particulièrement difficile d'établir les bons dosages. Beaucoup d'essais à l'échelle laboratoire sont donc nécessaires pour trouver un traitement optimal. Une surdose de coagulant chimique peut diminuer l'efficacité du système ;
- ❖ Les coagulants utilisés sont souvent corrosifs, des normes de sécurité doivent être respectées afin que les travailleurs manipulent ces substances avec précaution ;
- ❖ La présence d'aluminium résiduel peut entraîner des problèmes importants pour la santé comme l'Alzheimer et autres pathologies de ce genre. Il est donc toxique pour les écosystèmes ;
- ❖ Pour les pays en voie de développement, les coagulants chimiques peuvent être trop coûteux [27].

Les systèmes membranaires ont été utilisés pour le traitement de l'eau, en particulier pour le dessalement depuis plusieurs dizaines d'années. Récemment, ces systèmes ont été employés pour des applications plus diverses telles que l'élimination de la turbidité afin de répondre à différents objectifs de traitement.

Ainsi, des unités d'ultrafiltration ont été implantées en remplacement d'installations conventionnelles existantes. Ces systèmes présentent l'avantage d'utiliser peu de produits chimiques et engendrent des coûts d'exploitation relativement faibles [50].

-L'ultrafiltration offre la garantie d'une eau limpide et désinfectée, indépendamment de la qualité des eaux brutes. Peut traiter des eaux à turbidité élevée (obtention d'une turbidité inférieure à 0,1 NTU).

-Réduction de MES (sables fins, argile, limon), responsables des fortes pointes de turbidité à la suite d'orages, Elimination des germes pathogènes (parasites, bactéries, virus) [116].

-Avec ultrafiltration comme prétraitement, le système d'osmose inverse peut être exploité de façon plus fiable et à des taux plus élevés de flux.

-Les étapes de traitement en aval auront une plus grande productivité en raison que presque toutes les salissures auront été déjà enlevé par ultrafiltration.

-Les coûts d'investissement et d'exploitation de nano filtration en aval ou systèmes d'osmose inverse sont diminués sensiblement, puisque les systèmes peuvent fonctionner à des vitesses de flux élevées et avec moins d'efforts de nettoyage [77].

Après une description du prétraitement conventionnel utilisé actuellement sur la majorité des installations de dessalement par osmose inverse, le prétraitement par procédés membranaires est abordé, avec un intérêt plus particulier porté à l'ultrafiltration [5].

L'ultrafiltration n'utilise aucun réactif chimique, sauf pour leur entretien. Très fiable, une barrière fiable pour les micro-organismes et des particules, elle permette de produire une eau très pure et de qualité constante.

Capacité : l'encombrement des blocs de membranes est nettement inférieur à celui d'une chaîne classique avec coagulation décantation filtration de plus la modularité du système permet d'ajouter éventuellement des module de membranes ou de les remplacer facilement.

Fiabilité : continuité de la production d'eau, maximiser l'étanchéité entre l'eau brute et l'eau traitée.

Performance : Une seule étape pour clarifier et désinfecter l'eau, sont pratiquement indépendantes des variations de la turbidité.

Respect de l'environnement : régulation automatique d'injection de réactif aux variations de qualité d'eau ; absence de goût de chlore et pas de création de sous-produits nocifs; respect des normes et anticipation d'évolutions futures [115] ;

La conception de stations de traitement des eaux est pour chaque cas différent même si l'objectif reste identique. Nous opérons dans un premier temps à l'étude précise des besoins pour proposer la solution la plus adaptée, de plus en plus efficaces, fiables et la plus économique.

Tableau III.45 : Tableau comparatif des différentes techniques [117]:

Problèmes rencontrés	Système de traitement	
	Coagulation floculation	Ultrafiltration
Bactéries et virus	Non efficace, Traitement par UV ou UF	Une seule étape pour clarifier et désinfecter l'eau ;
Turbidité	Les phénomènes orageux ne se sont pas traités, capacité de rabattement < 100 NTU	Cette technologie garantit une eau de qualité constante et irréprochable quelles que soient les variations de qualité et de turbidité de l'eau à traiter. Rabattement de 500 à 0,2 NTU
métaux lourds, micropolluants organiques, pesticides, molécules organiques	Non efficace. Traitement par filtre à charbon actif ou une résine échangeuse d'ions obligatoire.	Les cartouches d'ultrafiltration vont retenir en partie les molécules organiques. En complément un filtre à charbon actif ou une résine échangeuse d'ions peut être envisageable.
Paramètres organoleptiques : goût, odeur, couleur	Traitement par charbon actif	Traitement par charbon actif
Mise en œuvre	Rapidité et facilité de mise en œuvre. Peu d'entretien	Rapidité et facilité de mise en œuvre, sécurité sanitaire ; entretien réduit ; les membranes d'UF ont une excellente durée de vie tout en conservant leur perméabilité
Lavage	Problème de dosage des réactifs.	Absence d'utilisation de réactifs : pas de problème de dosage. Rétro lavage fréquent. Nettoyage chimique annuel.

Notre travail a pour objectif l'amélioration de la qualité des eaux par une phase d'optimisation de la clarification, au niveau de laboratoire de traitement et d'épuration des eaux du Département d'Hydraulique à l'Université de Tlemcen et laboratoire de Sekkak sur des solutions salées et turbides (préparés).

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

La première partie du mémoire a donc consisté en un état des connaissances sur les différents procédés de prétraitement de l'eau de mer en particulier le procédé de coagulation-floculation décantation et l'ultrafiltration.

La seconde partie de notre travail a été consacrée à la présentation des résultats d'essais expérimentaux que nous avons réalisés dans le cadre de cette étude. Structurés en plusieurs chapitres, cette étude expérimentale a permis la description détaillée des réactifs utilisés ainsi que des protocoles expérimentaux suivis en cours des essais.

Notre étude théorique et pratique étant basée sur la reconnaissance des types de prétraitement les plus efficace et leurs fonctionnements.

L'étude de quelques paramètres de la qualité de l'eau traitée (la turbidité, le pH, la conductivité et la température), nous ramené a conclure que l'influence de la coagulation floculation décantation et ultrafiltration est largement remarquée sur la turbidité, en notant les grandes différences des valeurs trouvées avant et après pour la CFD et UF.

Dans l'étude de la conductivité pour les deux types de prétraitement, on a remarqué une influence sur ce paramètre, pour la coagulation floculation décantation elle augmente mais dans l'ultrafiltration il y une faible diminution.

Ultrafiltration peut fonctionner en donnant une bonne qualité de l'eau traitée avec un temps minimale présentent l'avantage d'utiliser peu de produits chimiques. Mais elle à des inconvénients qui sont très nombreux, c'est le type de filtration. Le colmatage est remarqué souvent surtout pendant le temps d'utilisation des grands débits.

- [1] : BELARBI.F, (2000), « Etude comparative de l'effet des caractéristiques physico-chimiques des particules solides sur la coagulation-floculation » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Génie rural Université de Blida.
- [2] : KETTAB. A, (1992), « Traitement des eaux », office des publications universitaires, 1, place centrale de ben-aknoun(Alger).
- [3] : BONIN.J, (1986), « Hydraulique urbaine », 1^{re} édition ,1977nouveau tirage 1986, édition eyrolles, 61, Bd saint-germain paris 5.
- [4] : SAOUDI.AA et HAKMI.H, (2007) « Influence de la pression et la concentration en sel sur les analyses physico-chimiques de l'eau dessalé » mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [5] : TANSAKUL.C, (2009), « Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse » thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse.
- [6] : MAALEJ.M(2002) « Le dessalement de l'eau dans le monde arabe (perspectives d'utilisation des énergies renouvelables) » http://www.alecso.org.tn/siteenergie-renouvelable2008/French/pdf_files/dessalement%20de%20l%27eau%20dans%20le%20Monde%20Arabe.pdf.
- [7] : SAOUDI. A, (2011), « L'influence de la filtration sur sable sur la qualité des eaux potables » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [8] : FECIH.L, (2012), « L'influence de la filtration sur sable sur le traitement des eaux saumâtres » Mémoire de Master en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [9] : SLIMANI.A et TOUATI.H, (2004), « Etude de la filtration sur sable » Mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [10] : MOUS.S et DAHMANI.S, (2004), « Etude de la filtration sur sable » mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [11] : HAMITIO, (2010), « L'influence des paramètres physico-chimique sur la performance de la station de dessalement de Ghazaouet ». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [12] : DESJARDINS. R, (1997), « Le traitement des eaux » 2^{ème} édition, édition l'école polytechnique de Montréal.
- [13] : DESJARDINS. R, (1990), « Le traitement des eaux »; deuxième édition : Presses internationales polytechnique; Montréal.
- [14] : LOUNNAS.A, (2009), « Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station Hamadi-Kroma de Skikda » Mémoire de Magister Université de Skikda.
- [15]: LENNTECH, www.lenntech.com/processes/desalination/pre-treatment/dechlorination.htm consulté le (12/12/2012).
- [16] : CASTANY.G, (1982), « Principe et méthode d'hydrogéologie » Paris.
- [17] : PERREAU B, (1998), « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres: les techniques d'hier et d'aujourd'hui » Contexte économique et perspectives.
- [18] : MAUREL.A, (2006), « Dessalement de l'eau de mer et les eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce » 2^{ème} Edition“ Paris, Edition Tec & Doc.
- [19] : DJELLOULI .R et BELARB.O, (2008), « Etude sur la coagulation floculation et décantation sur les eaux épurées de la STEP de Ain ELHOUTZ » mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.

- [20] : BECHKI.D, (2011), «Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes » thèse de Doctorat de l'Université de Batna.
- [21] : ZEGHOUDI.F et BENDJAMAI.R, (2003), « Etude de l'osmose inverse dans les pratiques de l'hydraulique urbaine » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [22] : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g04/proprietes-eau-de-mer-et-saumure> consulté le (22/03/2013).
- [23] : RODIER.J, (1976), « Analyse de l'eau (eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer) »: tome '2' ». edition Bordas.
- [24] : HAMIDI.M.N et NOUAH C.E, (1997), « Etude de la vulnérabilité à la pollution et la propagation des pollutions dans la nappe de Maghnia » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [25] : Dr : SALGHI.R, (2005), « Différents filières de traitement des eaux » Université IBN ZOHR Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir.
- [26] : SADI. M et TARMOUL. F, (2007), « détermination de la pollution résiduelle d'une STEP par lagunage naturel « cas de lagune de Beni-Messous »[www.memoire online](http://www.memoireonline.com).
- [27] : CHERIF.L, (2012), « L'influence de la coagulation-floculation et décantation sur le prétraitement des eaux saumâtres »Mémoire de Master en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [28] : AHONON.A.S, (2011), « évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface dans les zones montagneuses du sud-ouest du Togo : cas du canton de lavie » Mémoire de Master International Université de Lome.
- [29] : <http://www.cipel.org/sp/IMG/pdf/Eaux-potables-camp-02> consulté le (23/11/2012).
- [30] : CHRISTOPHE.H, (2008), « INTRODUCTION À L'ULTRAFILTRATION ET PRÉSENTATION DU PROJET DES GONELLES » Quai Maria Belgia 18, 1800 VEVEY, Suisse, <http://www.sige.ch>.
- [31] : LE TRAITEMENT DE L'EAU« Station de traitement d'eau potable de Lillion », <http://www2.ac-rennes.fr/cst/eaubrequigny/traitemt.htm>,consulté le (09/01/2013).
- [32] : GAID.A, (1984), « Epuration biologique des eaux usées urbaines », tome I, 1, place centre de benaknoun (Alger).
- [33] : VALIRON. F,(1989), « Gestion des Eaux : alimentation en eau - assainissement » Presses de l'école Nationale des ponts et chaussées, Paris.
- [34] : CHEVALE. A, (1982), «La désinfection des eaux de consommation », diffusion 11, rue Lavoisier.
- [35] : MOKHTARIA et DIR. B, (2006), « Analyse physico-chimique et bactériologique des eaux potables » Mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [36] : RICH.A, (2011), «Dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide : aspect thermodynamique et influence des conditions opératoires » Thèse de Doctorat Université MOHAMMED V AGDAL.
- [37] : CHENAOUI.B, (2011), « Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement » PDF, Chargé de cours Université de Chlef consulté le (04/03/2013).

- [38] : JARIRI. S, (2009), « expérience de l'onep en matière de dessalement d'eau » www.anafide.org/00000000000doc/hte%20142/142-15.pdf, consulté le (08/11/2012)
- [39] : <http://www.ecotoxicologie.fr> consulté le (03/02/2013).
- [40] : <http://tpedessalement77.e-monsite.com/la-distillation.html>, consulté le (05/02/2013).
- [41]: ALAAM. I et KAROOM. A, (2008), « Optimisation de fonctionnement d'une unité de traitement des eaux a Ain Salah » Mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [42] : VIVIANE. R, (2003) « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. » <http://culturesciences.chimie.ens.fr/taxonomy/term>, consulté le (10/01/2013).
- [43] : DIOP.S.N, (2010), « Elimination partielle du fluor et de la salinité des eaux souterraines du bassin arachidier par nano filtration et par adsorption sur argile ». Thèse de Doctorat Université de Dakar.
- [44] : JEAN-PIERRE. M, (2009), « Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire » Thèse de Doctorat Université de Toulouse.
- [45] : <http://dessalement.blogspot.com/2011/08/procedes-de-pretraitement-de-losmose.html> Consulté le (06/12/2012).
- [46] : MEMOTEC n°37 (2006) « Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse » www.gls.fr http://www.seor.dz/index.php?option=com_content&view consulté le 11/01/2012.
- [47] : <http://dessalement.blogspot.com/procedes-de-pretraitement-.html>,(19/01/2013).
- [48] : TRAITEMENT D'ULTRAFILTRATION, les grandes stations de dessalement : aspects techniques et économiques" M. ZAARA, RMSU MEDA Water Program) <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiere/groupe2/node/74> consulté le (19/02/2013).
- [49] : TAHRAOUI. D, (2010), « Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténès, Chlef. Impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique) Université de Chlef.
- [50] : BOZKAYA .B et DAINES.C et LESCOURRET .A.S et BIGNON A, (2007), « Elimination des pesticides dans les concentras membranaires » consulté le (10/02/2012).
- [51] : http://www.revue-ein.com/archives_actus/pdfs/703.pdf consulté le (17/03/2013).
- [52]: Dr BUSHMAN. A, « Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales ».version 2, Projet financé par l'Union européenne http://www.swim-sm.eu/files/BAT_on_Desalination_Final_FR.pdf consulté le 26/01/2013.
- [53]: TATA-DUCRU.F, (2009), « Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes ».
- [54] : BISSONNETTE .A, (2008), « Utilisation de nano membranes pour le dessalement de l'eau et comparaison avec l'osmose inverse et la distillation » Essai présenté en vue de l'obtention du grade de maître en environnement université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [55] : LO.S.M, (1994), « Rétention des ions métalliques par complexation ultrafiltration application au cadmium » Thèse pour obtenir Le Grade de Docteur Université de Dakar.
- [56] : BACCHIN.P, (2009), « Principes de bases de la filtration membranaire » Université Paul Sabatier TOULOUSE.
- [57] : ALFA ARZATE. Ph. D, (2008), « Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire »,

- http://www.centreacer.qc.ca/uploaded/Publications/78_Fr.pdf consulté le (22/12/2012).
- [58] : <http://www.ultraepur.com/traitement-eaux-ecologique.php> consulté le (27/03/2013).
- [59] : NECHAD.A, (2009), « Elaboation d'une membrane de filtration d'eau à base de polyéthylène basse densité et de gypse de bouzgggaia » Mémoire de Magister Université de Chlef.
- [60] : DEGREMONT, (2005), « Mémento technique de l'eau », 2^{ème} édition, Lavoisier SAS 14 rue de Provigny.
- [61] : GEA filtration par membranes osmose inverse, nano filtration, ultrafiltration et microfiltration : www.geafiltration.com.consulté le (17/03/2013).
- [62] : Eau potable La filtration sur membranes, un procédé d'avenir <http://www.cnrs.fr/cw/fr/pres/compress/mist190799bis.html>, consulté le (11/01/2013).
- [63] : POLYME, <http://www.polymem.fr/francais/applications/securisation-d-eau-reseau.html?lang=fr> consulté le (20/03/2013).
- [64] : <http://www.lms-water.com/dossiers/l-ultrafiltration> consulté le (20/02/2013).
- [65] : AQUASOURCE : <http://www.aquasource-membrane.com/-procede-filtration-eau-.html> consulté le (25/12/2012).
- [66] : <http://www.almeco.eu/bq/produits-services/traitement-deau/ultrafiltration.html> consulté le (20/02/2013).
- [67] : CHARBONNIER.C, (2011), « L'ultrafiltration, un traitement sans réactif » JOURNEE TECHN'EAU L'eau, un grand cru au robinet, consulte le (19/03/2013).
- [68] : L'ULTRAFILTRATION TECHNOLOGIES PROPRES ET SOBRES, (1995), <http://www.technologies-propres.com/pdf/ultrafiltration.pdf> consulté le (22/01/2013).
- [69] : JL MALFOY, (2009), « Systèmes d'Ultra filtration membranaire. » www.opalaqua.com OCEAN PROJECTS consulté le (17/12/2012).
- [70] : <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/22074/ch02.html#d0e952> consulté le (28/12/2012).
- [71] : SOUFI-KECHAOU.E, (2011), « Bioréacteur enzymatique couplé à 'ultrafiltration pour la valorisation des co- produits issus des industries de la pêche. Application à la seiche Sepia officinalis » <http://archimer.ifremer.fr/doc/00055/16645/14200.pdf> Consulté le (04/03/2013).
- [72] : ALAIN MAUREL : « Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtre » 2^e édition.
- [73] : HYAT, (2007), « Utilisation de l'osmose inverse cas de tizi ouzou »
- [74] : ANNE MENEZ, (2005), « Traitement des eaux potables » OI consulté le (17/04/2013).
- [75] : Ministère du Développement durable; de l'Environnement et des Parcs, (2002), « Guide de conception des installations de production d'eau potable - Volume 2 ».
- [76] : ADEME/DABEE/Département Industrie et Agriculture, (2006), « Les techniques membranaires » consulté le (29/04/2012).
- [77] : <http://www.almeco.eu/bq/produits-services/traitement-deau/ultrafiltration.html> consulté le (20/02/2013).
- [78] : BERLAND.J.M et JUERY.C, (2002), « Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau » consulté le (15/01/2013).
- [79] : MAUREL.A, « Techniques séparatives à membranes : Considérations théoriques »PDF.

[80] : BUSNOT. A, (2006), « Comparaison des performances de membranes MF-UF sur une eau de surface »

http://www.eau-seinenormandie.fr/fileadmin/mediatheque/Dossier_partage/ETUDES-Logo/Rapports/05AEP05.pdf consulté le (24/04/2013).

[81] : BESSIERE.Y, (2005), « Filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtre critique pour l'anticipation et le contrôle du colmatage » Thèse de Doctorat l'Université de Toulouse III.

[82] : SAHRAOUI.H et BENAÏSSA.O, (1998), « Modélisation mathématique du taux de coagulation dans la station de traitement de l'eau de la TAFNA », Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique Université de Tlemcen.

[83] : BACHIM et ABDELLIR, (2005), « L'influence des paramètres physico-chimiques sur la coagulation-floculation et décantation », mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.

[84] : EZZIANE.S, (2007), « Traitement des eaux de rejets de l'unité de TENES » mémoire de Magister Université de Chlef.

[85] : ELIAS ASSAAD, (2006), « Etude du processus de coagulation-floculation du système montmorillonite-chitosane dans l'élimination de métaux de transition » Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en chimie Université du Québec à Montréal.

[86] : BOURSALI.I, (2011), « Etude expérimentale de la coagulation-floculation par le sulfate ferrique et le chlorure ferrique des matières en suspension », Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Géologie Université de Tlemcen.

[87] : DELTALAB : Bultin Technique du pilote de coagulation-floculation et décantation.

[88] : KABLI et KAZOUZ, (2004), « Etude expérimentale sur la coagulation-floculation et décantation » mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.

[89] : LAKHDARI.B, (2011), « Effet de la coagulation floculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain AL HOUTZ », mémoire de Magister en Chimie Inorganique et Environnement Université de Tlemcen.

[90] : GODART.H, « Eaux de distribution – Clarification, » techniques de l'ingénieur.

[91] : BONTOUX. J, (1983), « Introduction a l'étude des eaux douces : eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson »², rue Armand Stévert,B-4000 LIEGE(Belgique).

[92] : EAUD PARIS, (2006), « Traitement de potabilisation des eaux de surface adsorption surcharbonactif »;http://step.ipgp.fr/images//ADSORPTION_SUR_CHARBON_ACTIF.pdf

[93] : BRAHMI.Z et BENAÏSSA.N, (2010), « Influence de la coagulation floculation et décantation sur la qualité des eaux épurées de la station de Ain EL HOUTZ » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique Université de Tlemcen.

[94] : ANNE-MARIE, (2011), « Traitement des eaux conventionnel : coagulation et filtration » www.safewater.org consulté le (27/04/2013).

[95] : CLAUDE.C, (1999), « Les traitement de eau », ellipses édition marketing S.A, 1999, rue Bague 75740 paris.

[96] : <http://www.drinkingwater.org/assets/181x/00000445.jpg> consulté le (10/02/2013).

[97] : Desjardins. C, (1999), «Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée (actiflo") a l'aide d'une procédure modifiée de jar test » Mémoire présente en vu de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées Université de Montréal.

- [98] : SACI .D et BERAHMI .K (1997), « Etude sur la coagulation de l'eau résiduaire de la STEP de l'Unité SOITEX TLEMCEN et de l'eau brute de la STEP de LALA SETI TLEMCEN » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [99] : MASSCHELEIN. W. J (1996), « processus unitaire du traitement de l'eau potable », éditions cebedocs.p.r.l.liège.
- [100] : WISNIEWSKI.C, (2010), « Le traitement des effluents liquides : les procédés physico-chimiques » Université Montpellier 1.
- [101] : HERNANDEZ DE LEON H.R, (2006), « Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable » Thèse de Doctorat Université de Toulouse.
- [102] : MEKHALIF. F, (2009), « Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement » Mémoire de Magister Université du SKIKDA.
- [103] : LEVALLOIS. P, (2005), « Les risques et bénéfices associés a l'utilisation de l'aluminium dans le traitement de l'eau potable » Institut national de la santé publique du Québec.
- [104] : BESSEDIK .M, (2011), CHARGE DE COUR Technologie de traitement des eaux.
- [105] : TOSUN-BAYRAKTAR.A, « TRAITEMENT DES EAUX USEES : Traitements physicochimiques », http://industriesdesprocedes.perso.sfr.fr/mcme/EAUXUSEES/1_3.pdf consulté le (10/01/2013).
- [106] : BOUMEDIYOU.S et DJALALI.I, (2005), « Les essais des coagulations sur les eaux résiduaire industrielles de complexe SOITEX SEBDOU », mémoire DEUA en Hydraulique Université de Tlemcen.
- [107] : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0304/optsee/bei/5/binome4/eauxres.htm> consulté le (15/01/2013).
- [108] : http://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich4_4.htm consulté le (25/11/2012).
- [109] : JESTIN. E « La production et le traitement des eaux destinées a l'alimentation et a la préparation de denrées alimentaires » Direction des Bocages Normands 1, rue de la pompe 14200 Hérouville-Saint-Clair.
- [110] : <http://www.siarl.fr/images/decantation.gif> consulté le (13/04/2013).
- [111] : Dégrémont, (1972), « mémento technique de l'eau », 11, rue la voisier-paris (8^e).
- [112] : DELTALAB : Bultin Technique du pilote d'ultrafiltration (TE300).
- [113] : TESTELIN.C, (2008), « ultrafiltration »
<http://www2b.aclille.fr/biotechnologies/Diaporamas%20BioAC/Ultrafiltration.pps> consulté le (17/01/2013).
- [114] : FICHE D'ÉVALUATION TECHNIQUE du comité sur les technologies de traitement en eau potable (2012) zeeweed® 1000 (zw-1000) sans coagulation niveau de développement : en validation à l'échelle réelle
- [115] Tahri.T,Bettahar.A,Douani.V,S.AbdulWahab.A, AlHinai. H, AlMulla. Y « Dessalement de l'eau de mer par l'énergie solaire en vue de l'irrigation d'une serre agricole ».
- [116] : SANCIO.R, (2010), « Traitement de l'eau potable par ultrafiltration (UF) » www.jag.ch.
- [117] : www.elessia.com/fr/tableau-comparatif-des-differentes-techniques.html(12/02/2013).