

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad DAHLAB BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie Chimique

Intitulé du mémoire

**Solutions adaptatives de la haute turbidité en périodes de
crues de l'eau de mer à la station de dessalement de Ténès,
Algérie**

Présenté par : OUAKLI Hadjer

Soutenu le 03 juin 2024 devant les membres du jury :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. Aouabed Ali	Professeur	Président
Mme. Lazli Wassila	Maitre assistante B	Examinatrice
Mr. Naceur Wahib	Professeur	Promoteur

Année universitaire 2023 / 2024

RESUMES

تتناول هذه الرسالة مشكلة معالجة المياه في محطة تحلية تنس، التي تواجه مستويات عالية من الجسيمات العالقة خلال الفيضانات، مما يؤثر على استمرارية وكفاءة العمليات. يتمثل الحل المقترح في تركيب مُرسِّبات لتحسين التوضيح في عملية المعالجة الأولية باعتماد تكنولوجيا أكتيفلو من فيوليا.

الكلمات المفتاحية: تحلية مياه البحر، التوضيح، الجسيمات العالقة، أكتيفلو، تنس

Ce mémoire aborde la problématique du traitement de l'eau à la station de dessalement de Ténès, qui est confrontée à des niveaux élevés de matières en suspension (MES) pendant les périodes de crues, compromettant ainsi la continuité et l'efficacité des opérations. La solution proposée consiste en l'implantation de décanteurs pour améliorer la clarification dans le processus de prétraitement par l'adoption de la technologie Actiflo de Veolia, qui utilise la micro-sable pour accélérer la sédimentation.

Mots clés : dessalement, clarification, matières en suspension, Actiflo, Ténès

This thesis addresses the issue of water treatment at the Ténès desalination plant, which faces high levels of suspended solids (TSS) during floods, thereby compromising the continuity and efficiency of operations. The proposed solution involves the installation of lamella settlers to improve clarification in the pretreatment process by adopting Veolia's Actiflo technology, which uses microsand to accelerate sedimentation.

Key words: desalination, clarification, total suspended solids, Actiflo, Ténès

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien et l'engagement de plusieurs personnes à qui je tiens à exprimer ma profonde gratitude.

Je souhaite tout d'abord témoigner ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Monsieur Naceur, dont la patience, la disponibilité et les conseils judicieux ont été essentiels à l'élaboration de ce travail. Sa guidance éclairée a grandement nourri ma réflexion.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres du jury, notamment le président, le Professeur Aouabed, et l'examinatrice, Madame Lazli, pour leur disponibilité et leur rigueur dans l'évaluation de ce travail.

Un remerciement spécial est adressé aux professeurs de la faculté de génie des procédés, en particulier le Professeur Touil, le Professeur Bouras, et le Professeur Djeghdjeh. Leur expertise et leur dévouement m'ont fourni les outils indispensables à la réussite de mes études supérieures.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Mr. Ghezala Sami, Mr. Hafied Yacine, Mr. Toumi Yassine, et Mme. Merouani Zaineb, des ingénieurs et experts dans le domaine du traitement de l'eau et du dessalement, dont les conseils experts et les discussions techniques ont grandement enrichi mon travail. Leur apport professionnel a été crucial pour aborder les aspects les plus complexes de ma recherche.

Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance envers ma famille et amis qui m'ont apporté leur soutien moral tout au long de ma démarche.

Enfin, je souhaite me remercier moi-même pour l'engagement et la persévérance dont j'ai fait preuve durant ce parcours académique. Ce projet a exigé de la rigueur et une volonté d'apprendre qui m'ont permis de dépasser les défis rencontrés et de m'enrichir tant professionnellement que personnellement.

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
1. Chapitre 01 : Fondements Théoriques.....	3
1.1 Principes de la coagulation, floculation, et décantation	3
1.1.1 Coagulation	3
1.1.2 Floculation.....	4
1.1.3 Décantation.....	5
1.2 Aperçus des mécanismes physico-chimiques impliqués dans la coagulation floculation.....	6
1.2.1 Adsorption.....	6
1.2.2 Nucléation	6
1.2.3 Croissance des floes	6
1.2.4 Interactions physico-chimiques.....	7
1.2.5 Sédimentation gravitationnelle.....	7
1.2.6 Clarification et interface	7
1.2.7 Compaction des boues.....	8
1.2.8 Phénomènes de percolation et de filtration	8
2. Chapitre 02 : Coagulation et Floculation dans le Dessalement.....	9
2.1 Description des coagulants et floculants utilisés spécifiquement pour les eaux de mer	9

2.1.1	Coagulants inorganiques	9
2.1.2	Floculants organiques.....	9
2.2	Étude des paramètres influençant l'efficacité de ces traitements (pH, salinité, température) 10	
2.2.1	Le pH.....	10
2.2.2	Influence de la salinité.....	13
2.2.3	Influence de la température	13
2.3	Techniques et technologies avancées (usage de polymères, biopolymères, etc....).....	14
2.3.1	Utilisation du ferrate liquide.....	14
2.3.2	Développement de l'adoucissement et de la floculation ballastée comme procédé de prétraitement.....	15
2.3.3	La technique de précipitation chimique	15
2.3.4	La coagulation double de chitosan-alun/chlorure ferrique.....	16
2.3.5	Copolymères cationiques	16
2.3.6	Polymères Synthétiques	16
2.3.7	Biopolymères : Alginate.....	17
2.3.8	Polymères naturels modifiés	18
3.	Chapitre 03 : Décantation et Séparation des Flocs.....	19
3.1	Technologie et configuration des décanteurs utilisés dans le dessalement.....	19
3.1.1	Décanteurs lamellaires	19

3.1.2	Décanteurs à flottation par air dissous (DAF).....	19
3.1.3	Décanteurs centrifuges	20
3.2	Impact de la qualité de l'eau du prétraitement de dessalement sur l'osmose inverse	21
3.3	Optimisation des processus de décantation lamellaire pour le dessalement.....	22
3.3.1	Matériaux.....	22
3.3.2	Angle d'inclinaison et espacement optimaux	23
4.	Chapitre 04 : Étude de Cas des stations de dessalement	25
4.1	Analyse de cas de stations de dessalement utilisant des technologies avancées	25
4.1.1	Efficacité de la micro-ultrafiltration dans l'amélioration du prétraitement du dessalement 25	
4.1.2	Efficacité de la distillation membranaire dans l'amélioration du prétraitement du dessalement	26
4.1.3	Efficacité de l'osmose directe dans l'amélioration du dessalement	27
4.1.4	Efficacité des procédés hybrides dans l'amélioration du dessalement	29
4.2	Efficacité, coûts opérationnels, et impacts environnementaux.....	31
4.2.1	Capacité et efficacité énergétique.....	31
4.2.2	Coûts opérationnels	32
4.2.3	Impacts environnementaux.....	33
4.3	Évaluation de l'empreinte carbone des stations de dessalement Algériennes.....	34
4.3.1	Consommation énergétique et émissions de CO2.....	34

4.3.2	Initiatives de réduction des émissions	35
5.	Chapitre 05 : amelioration du prétraitement de la station de dessalement de TENES	36
5.1	Présentation de la zone d'étude	36
5.1.1	La zone géographique	36
5.1.2	Le climat.....	36
5.2	Situation géographique et la topographie de la station de dessalement.....	37
5.3	Capacité de production de l'usine	39
5.4	Caractéristiques techniques de l'usine de dessalement d'eau de mer de la ville de Ténès ..	39
5.5	Caractéristiques de l'eau à traiter	40
5.6	Caractéristiques de l'eau destinée à la consommation humaine (DCHU).....	40
5.7	Processus de dessalement TENES	41
5.7.1	La prise en mer (Intake)	41
5.7.2	Prétraitement chimique.....	41
5.7.3	Prétraitement physique	42
5.7.4	L'Osmose inverse	42
5.7.5	Le post-traitement.....	43
5.7.6	Gestion des déchets solides et émissions atmosphériques	43
5.8	La problématique	44
5.9	Les variantes proposées	45

5.9.1	Gestion intégrée et surveillance proactive du bassin versant	45
5.9.2	Optimisation de la localisation des prises d'eau	46
5.9.3	Élévation et ajustement de la tour de captage	47
5.9.4	Utilisation de barrières à sédiments.....	48
5.9.5	Amélioration du prétraitement	48
5.10	Le choix de la variante	50
5.11	Système de Distribution.....	51
5.12	Dimensionnement du decanteur.....	51
5.13	Discussion des résultats	59
5.14	Proposition de solution alternative.....	59
5.14.1	Technologie Actiflo	60
5.14.2	Les caractéristiques du fonctionnement de l'Actiflo.....	60
5.14.3	Implantation de l'Actiflo dans la station de dessalement de Tenes.....	66
5.15	Discussion des résultats	66
	Références Bibliographiques.....	70

LISTE DES FIGURES

Figure 0-1 Mécanismes de la Coagulation : Neutralisation de Charge et Coagulation par Entraînement	3
Figure 0-2 Processus de coagulation et floculation : de la formation des microflocs aux floccs	4
Figure 0-3 Étapes du Traitement de l'Eau : Coagulation, Floculation et Sédimentation	5
Figure 2-1 Diagramme de prédominance des formes du fer en fonction du pH et du potentiel d'oxydoréduction	11
Figure 2-2 Répartition des produits d'hydrolyse du sulfate d'aluminium selon le pH	12
Figure 3-1 Schéma d'un décanteur lamellaire	19
Figure 3-2 Schéma d'décanteur à flottation par air dissous	20
Figure 3-3 Schéma de fonctionnement d'un décanteur centrifuge avec séparation des solides et des liquides	21
Figure 5-1 Carte satellite de la région de Ténès, Algérie	36
Figure 5-2 Vue satellite de la station de dessalement de Ténès, Algérie	38
Figure 5-3 Zone disponible pour l'exploitation à la station de dessalement de Ténès, Algérie	45
Figure 5-4 Unité Actiflo de Veolia : décanteur lamellaire pour le traitement de l'eau	59
Figure 5-5 Schéma de l'unité Actiflo de Veolia : processus de coagulation, floculation et décantation lamellaire	61
Figure 5-6 Illustration 3D d'un système de traitement Actiflo avec décantation lamellaire	61
Figure 5-7 Illustration du bassin de coagulation de l'unité Actiflo après l'addition de coagulant	62

Figure 5-8 Illustration de l'injection de polymère et de microsable dans le bassin de floculation de l'unité Actiflo 63

Figure 5-9 Processus de décantation dans l'unité Actiflo : séparation des floes lestés 64

Figure 5-10 Évacuation de l'eau clarifiée et séparation des boues et du microsable dans l'unité Actiflo 65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5-1 Paramètres de Qualité de l'Eau de Mer de la Station de Dessalement de Ténès, Algérie	40
---	----

LISTE DES ABREVIATIONS

MES - Matières En Suspension

DOC - Dissolved Organic Carbon

DAF - Décanteurs à Flottation par Air Dissous

SWRO - Seawater Reverse Osmosis

SDI - Silt Density Index

TEP - Transparent Exopolymer Particles

OD - Osmose Directe

DCMD - Distillation Membranaire à Contact Direct

CPAM - Polyacrylamides Cationiques

STEC - Specific Thermal Energy Consumption

INTRODUCTION

La disponibilité d'une source d'eau de qualité représente un défi fondamental pour les sociétés contemporaines, notamment dans les régions caractérisées par une aridité prononcée, où les ressources en eau douce sont limitées. Dans ce contexte, le dessalement de l'eau de mer émerge comme une solution cruciale pour répondre aux besoins en eau potable et industrielle. Toutefois, afin de maximiser l'efficacité des procédés de dessalement, il est impératif de recourir à un prétraitement de l'eau brute.

Le prétraitement revêt une importance capitale au sein du processus global de dessalement, en garantissant la préservation de l'intégrité des membranes d'osmose inverse contre l'encrassement, ainsi que leur durabilité. En éliminant les particules en suspension et les matières colloïdales, le prétraitement contribue à améliorer la qualité de l'eau d'alimentation et à réduire les coûts opérationnels. Les techniques de coagulation, de floculation et de décantation se distinguent comme des méthodes particulièrement efficaces pour cette finalité, favorisant une séparation plus efficace des impuretés et une performance optimale des membranes.

Le présent mémoire s'attache à explorer l'importance capitale du prétraitement, mettant en exergue les techniques de coagulation, de floculation et de décantation, tout en examinant les défis spécifiques rencontrés au sein de la station de dessalement de Ténès. Cette dernière est confrontée à une problématique significative liée à une turbidité élevée de l'eau de mer, notamment durant les périodes de précipitations abondantes. Cette situation excède fréquemment les capacités des systèmes de clarification actuellement en place, induisant des interruptions récurrentes des opérations et une dégradation accélérée des membranes d'osmose inverse. En réponse à ces enjeux, cette étude propose des solutions adaptatives visant à améliorer la gestion de la turbidité et à garantir une production continue et de qualité.

Ce travail de recherche débute par une exploration approfondie des principes de coagulation, floculation et décantation, essentiels pour comprendre les défis du traitement préliminaire dans des conditions de haute turbidité. Poursuivant avec une revue des innovations récentes en matière de coagulants et floculants, le texte se penche sur leur adaptation spécifique au contexte marin. Par la

suite, nous évaluons les technologies de décantation les plus efficaces pour gérer la turbidité élevée, illustrées par des études de cas pratiques. Enfin, le mémoire conclut avec des propositions d'améliorations spécifiques pour la station de dessalement de Ténès, notamment l'intégration de la technologie Actiflo, afin d'optimiser la gestion de la turbidité lors des crues.

CHAPITRE 01 : FONDEMENTS THEORIQUES

1.1 Principes de la coagulation, floculation, et décantation

1.1.1 Coagulation

La coagulation est la première étape cruciale dans le traitement de l'eau visant à éliminer les particules en suspension. Ce processus implique l'ajout de coagulants tels que les sels de fer (FeCl_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) ou les sels d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) dans l'eau. Ces coagulants fonctionnent en neutralisant les charges négatives présentes à la surface des particules colloïdales, favorisant ainsi leur agglomération. [1]

Lorsque les coagulants sont ajoutés à l'eau, ils subissent une hydrolyse, formant des espèces cationiques qui réduisent les forces de répulsion électrostatiques entre les particules, permettant ainsi leur agrégation. Par exemple, les ions trivalents comme Al^{3+} ou Fe^{3+} sont particulièrement efficaces pour cette tâche car ils peuvent neutraliser les charges plus rapidement et former des précipités plus volumineux. [2]

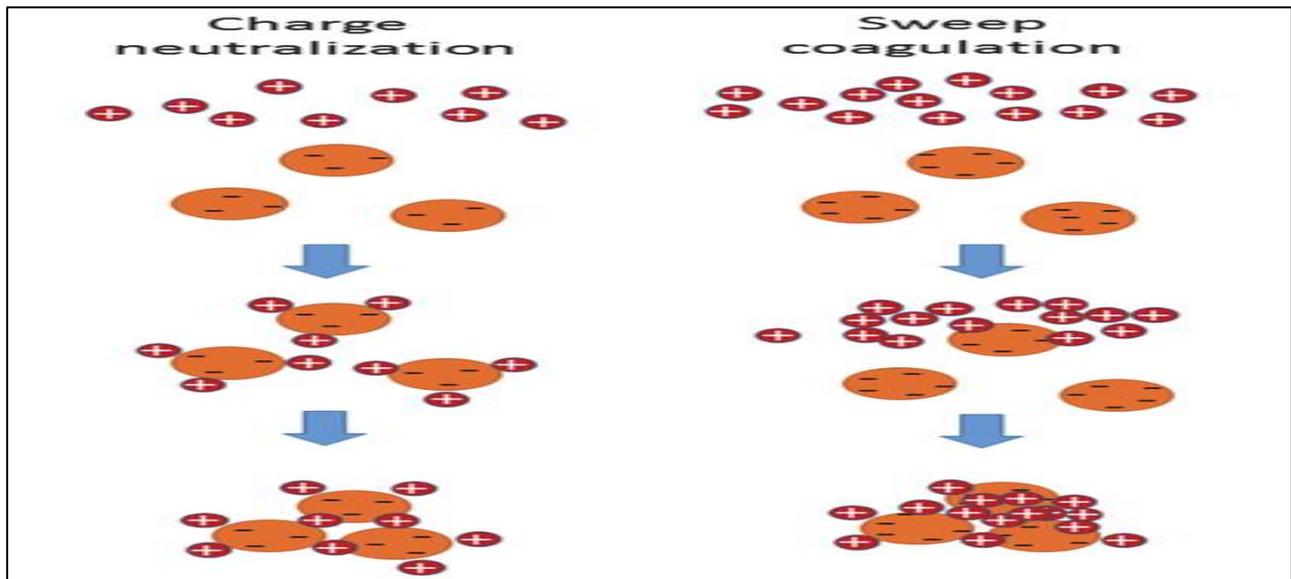


Figure 1-1 Mécanismes de la Coagulation : Neutralisation de Charge et Coagulation par Entraînement [3]

1.1.2 Floculation

Après la coagulation, la floculation est la seconde étape où les particules coagulées commencent à se rassembler pour former des floes plus grands. Ce processus est facilité par l'ajout de floculants, généralement des polymères comme les polyacrylamides, qui lient les particules ensemble [4]. Les forces physico-chimiques telles que les forces de van der Waals et les ponts hydrogène jouent un rôle crucial dans ce processus, permettant aux particules de se connecter et de former des agrégats plus volumineux. L'agitation douce est souvent nécessaire pour favoriser ces interactions sans briser les floes formés. L'optimisation de la sélection et du dosage des agents floculants est essentielle pour garantir l'efficacité de ce processus, car une floculation trop intense ou trop faible peut entraîner une formation de floes inadéquate. [5]

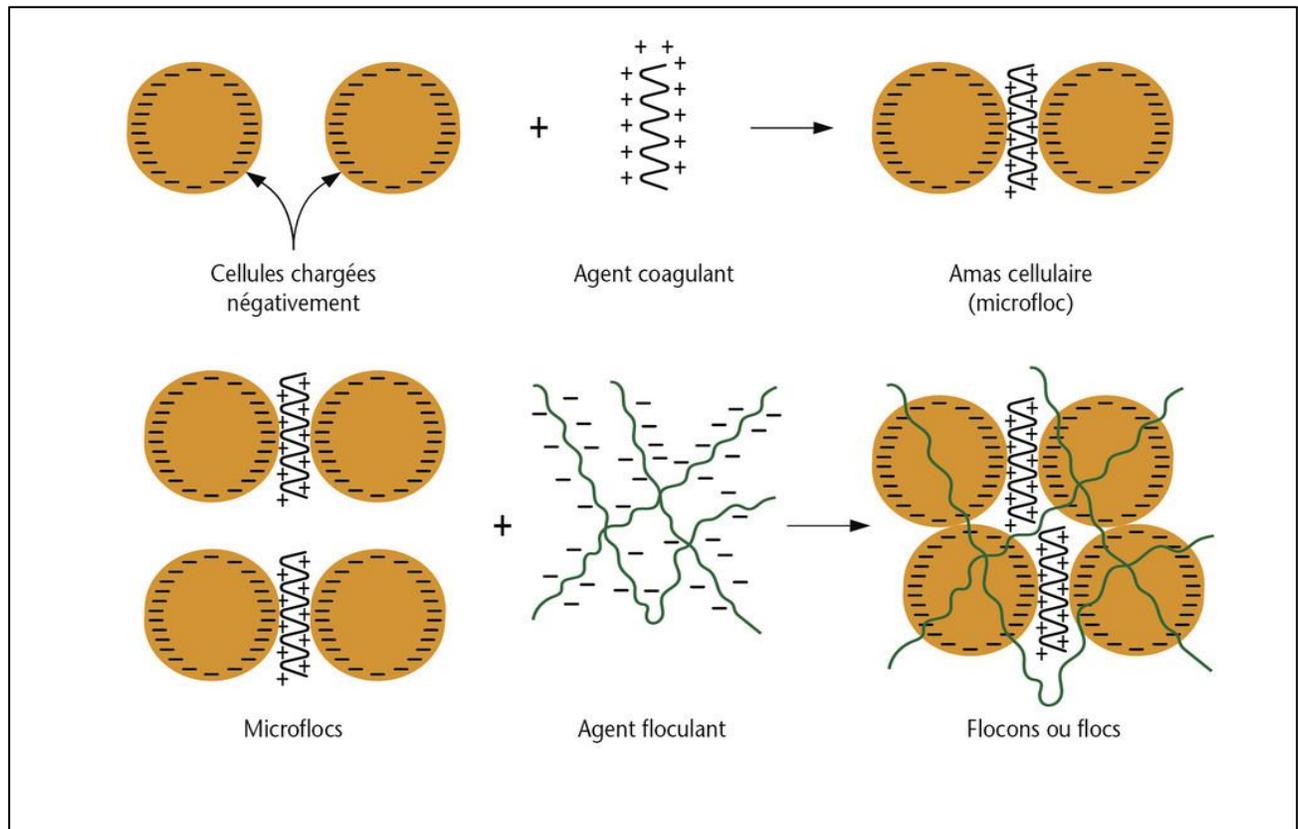


Figure 1-2 Processus de coagulation et floculation : de la formation des microflocs aux floes [6]

1.1.3 Décantation

La décantation est l'étape finale où les floccs formés sont séparés de l'eau. Ce processus repose principalement sur la gravité pour permettre aux floccs de se déposer au fond du bassin de décantation, tandis que l'eau clarifiée est recueillie en surface [7]. L'efficacité de la décantation dépend de plusieurs facteurs, notamment la taille et la densité des floccs, ainsi que les conditions hydrodynamiques dans le sédimentateur ; plus les floccs sont grands et denses, plus ils se déposent rapidement. La configuration des décanteurs, comme l'utilisation de décanteurs lamellaires, peut améliorer l'efficacité de la séparation en augmentant la surface disponible pour la sédimentation. Cela permet une clarification plus rapide et plus efficace de l'eau. [8]

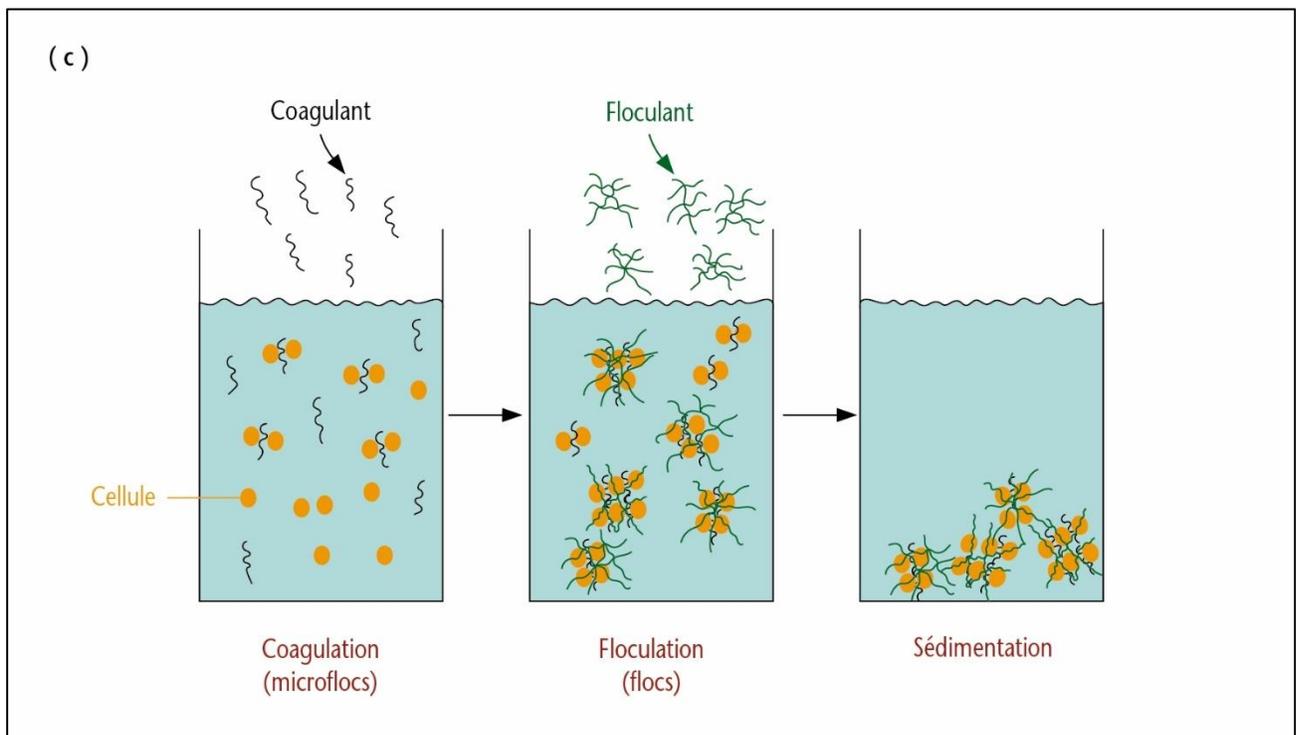


Figure 1-3 Étapes du Traitement de l'Eau : Coagulation, Flocculation et Sédimentation [9]

1.2 Aperçus des mécanismes physico-chimiques impliqués dans la coagulation floculation

Les mécanismes physico-chimiques jouent un rôle crucial dans les processus de traitement de l'eau, en particulier lors de la coagulation, floculation, décantation. Comprendre ces mécanismes permet d'optimiser chaque étape du traitement, en améliorant l'efficacité et la qualité de l'eau traitée.

1.2.1 Adsorption

Les interactions telles que les forces de van der Waals, les ponts hydrogène et les interactions électrostatiques sont au cœur de ce mécanisme. Les coagulants et floculants, en fournissant des surfaces actives, facilitent la capture des particules colloïdales en suspension dans l'eau. Par exemple, les sels d'aluminium et de fer, couramment utilisés comme coagulants, agissent en neutralisant les charges des particules et en créant des sites d'adsorption efficaces. [10]

1.2.2 Nucléation

La nucléation est le processus initial de formation des particules solides à partir de l'état dissous. Ce processus est influencé par des conditions thermodynamiques et cinétiques spécifiques. Lors de la nucléation, les particules se forment et commencent à croître, initialement à partir de petites impuretés ou de particules déjà présentes dans l'eau [11]. Les coagulants peuvent induire la nucléation en fournissant des surfaces favorables à la précipitation des ions dissous. Cela conduit à la formation de particules plus grandes qui sont plus faciles à éliminer par floculation et décantation. [12]

1.2.3 Croissance des floccs

Une fois les particules nucléées, la croissance des floccs devient déterminante pour la séparation des solides de la phase liquide. Ce processus implique l'agglomération et la coalescence des particules sous l'effet de forces physico-chimiques [13]. La concentration des coagulants, le taux de cisaillement et le temps de floculation sont des paramètres cruciaux pour la croissance des floccs. Des floccs plus grands et plus denses se sédimentent plus facilement, améliorant ainsi l'efficacité de la décantation.

Par exemple, l'utilisation de polymères flocculants peut augmenter significativement la taille des floccs en reliant les particules par des ponts polymériques. [14]

1.2.4 Interactions physico-chimiques

Les interactions entre les particules, les coagulants et les flocculants sont fondamentales pour la formation et la stabilité des floccs. Les forces de van der Waals, les interactions hydrophobes et les ponts hydrogène sont les principaux mécanismes qui gouvernent ces interactions. Par exemple, les particules colloïdales peuvent être stabilisées par des charges de surface, et les coagulants agissent en neutralisant ces charges, facilitant ainsi l'agglomération. Une compréhension approfondie de ces forces permet de mieux contrôler les conditions de coagulation et flocculation pour maximiser l'efficacité du traitement. [15]

1.2.5 Sédimentation gravitationnelle

La salinité élevée dans les eaux de mer influence la sédimentation gravitationnelle en modifiant les propriétés physico-chimiques des floccs, notamment leur densité et viscosité. Cela affecte leur capacité à se déposer rapidement. En présence de sel, les interactions ioniques peuvent altérer la structure des floccs, rendant leur agglomération plus ou moins stable et modifiant ainsi leur vitesse de descente vers le fond du décanteur. [16]

1.2.6 Clarification et interface

La clarification est le processus par lequel les particules en suspension et les contaminants sont retirés de l'eau. La gestion de l'interface fait référence au contrôle de la zone de transition entre les floccs sédimentés et l'eau clarifiée. Ces étapes sont particulièrement critiques dans les eaux de mer en raison de la présence accrue de minéraux et de la salinité élevée. Ces facteurs influencent la densité et la stabilité des floccs en modifiant les interactions ioniques, ce qui peut rendre les floccs plus ou moins compacts [17]. La salinité élevée augmente également la viscosité de l'eau, ralentissant ainsi la sédimentation des floccs et nécessitant des ajustements dans la gestion du flux pour maintenir une séparation efficace. Une gestion soignée de ces paramètres est nécessaire pour prévenir la

resuspension des particules, essentielle pour garantir la qualité de l'eau clarifiée après le traitement. [18]

1.2.7 Compaction des boues

La compaction des floccs consiste à augmenter leur densité en réduisant l'espace entre les particules qui les composent. Cela se fait naturellement sous l'effet de la gravité, mais peut être amélioré par des ajustements chimiques et physiques pour rendre les floccs plus solides et moins volumineux, facilitant ainsi leur collecte et leur traitement ultérieur [19]

Dans les eaux de mer, la compaction des floccs est influencée par la salinité élevée. Les sels dissous augmentent la densité des floccs et modifient les forces électrostatiques et ioniques entre les particules, ce qui peut aider à rendre les floccs plus compacts et denses, facilitant leur sédimentation et leur collecte. Toutefois, une salinité élevée peut également rendre les floccs plus fragiles si les conditions de coagulation et de floculation ne sont pas optimales. [18]

1.2.8 Phénomènes de percolation et de filtration

Dans les eaux de mer, l'eau s'écoule à travers les floccs en direction verticale, de haut en bas. Les floccs, formés par coagulation et floculation, agissent comme des filtres naturels. Les particules plus grosses et les contaminants sont piégés dans les pores des floccs, tandis que l'eau clarifiée continue de s'écouler à travers ces pores. [20]

La porosité et la perméabilité des floccs jouent un rôle crucial dans l'efficacité de cette filtration. Plus les floccs sont poreux, plus l'eau peut s'écouler facilement à travers eux, permettant une meilleure clarification. Les floccs formés dans des environnements à haute salinité ont tendance à être plus stables et plus denses, mais présentent une porosité réduite, ce qui peut diminuer l'efficacité de la filtration. [21]

CHAPITRE 02 : COAGULATION ET FLOCCULATION DANS LE DESSALEMENT

2.1 Description des coagulants et flocculants utilisés spécifiquement pour les eaux de mer

Dans le cadre du prétraitement pour les installations de dessalement par osmose inverse, une gamme de coagulants et flocculants est utilisée pour minimiser le risque d'encrassement des membranes.

2.1.1 Coagulants inorganiques

- **Chlorure ferrique (FeCl₃) et chlorure d'aluminium (AlCl₃)** : Utilisés pour leurs capacités à améliorer l'enlèvement des particules et à réduire la turbidité et les composés organiques dissous (DOC). Ces coagulants sont efficaces grâce à leur capacité à neutraliser les charges des particules en suspension, facilitant ainsi leur agglomération et leur élimination ultérieure. [22]
- **Sulfate d'aluminium (Alun)** : Couramment utilisé pour sa capacité à agglutiner les particules fines en agrégats plus gros, ce qui améliore significativement la clarté de l'eau avant le traitement par osmose inverse. [22]

2.1.2 Flocculants organiques

- **Polyélectrolytes** : Ces polymères synthétiques sont ajoutés pour améliorer la formation de floccs après l'ajout de coagulants inorganiques. Ils sont utiles pour leur efficacité en faible dosage et leur capacité à fonctionner sur une large gamme de pH. [23]
- **Chitosan** : C'est un biopolymère dérivé de la chitine, que l'on trouve dans les carapaces de crustacés. Le chitosan est apprécié pour ses propriétés flocculantes naturelles, sa capacité à éliminer les métaux lourds et les autres polluants organiques et inorganiques. Il est biodégradable, non toxique, et efficace à des pH relativement neutres, ce qui le rend idéal pour les applications de dessalement. [24]

2.2 Étude des paramètres influençant l'efficacité de ces traitements (pH, salinité, température)

2.2.1 Le pH

Dans les eaux de mer, caractérisées par une salinité élevée, le chlorure ferrique (FeCl_3) tend à être plus performant que le sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), également connu sous le nom d'alun, pour plusieurs raisons liées aux propriétés chimiques et physiques des deux coagulants et à l'influence de la salinité sur leur efficacité. [22]

- **Chlorure Ferrique**

Solubilité : Le chlorure ferrique est hautement soluble dans l'eau, même en présence de fortes concentrations de sels dissous. Cette solubilité permet une dispersion efficace des ions Fe^{3+} dans l'eau de mer. [25]

Hydrolyse : En solution, le FeCl_3 se dissocie et hydrolyse pour former des espèces hydrolysées comme $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ et principalement $\text{Fe}(\text{OH})_3$ qui sont efficaces pour neutraliser les charges des particules colloïdales et former des floes. [25]

pH Optimal : Le chlorure ferrique montre une efficacité optimale dans une plage de pH de 4 à 6. Cette gamme acide favorise la formation de floes d'hydroxyde ferrique, essentiels pour la clarification de l'eau. Toutefois, l'eau de mer présente généralement un pH légèrement basique d'environ 8, ce qui peut compromettre la formation et l'efficacité des floes de chlorure ferrique. Pour résoudre cette incompatibilité, il est souvent nécessaire d'ajuster le pH de l'eau de mer avant l'introduction du chlorure ferrique. L'ajustement du pH peut se faire par l'addition de modificateurs de pH qui assurent le maintien de l'efficacité du coagulant même dans des conditions basiques. Cette adaptation permet d'exploiter le potentiel du chlorure ferrique pour la coagulation dans l'eau de mer, malgré les défis posés par son pH naturellement élevé. [25]

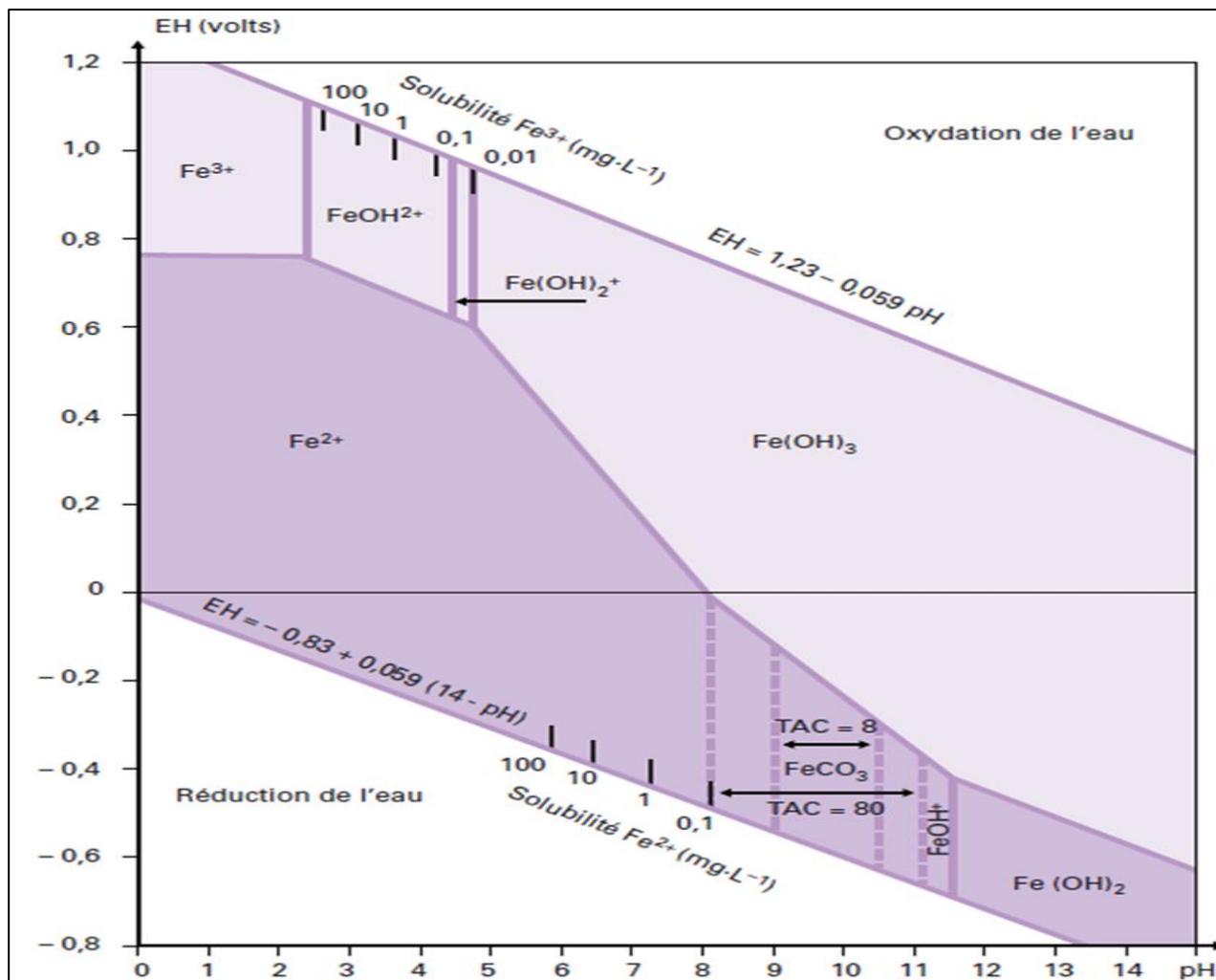


Figure 2-1 Diagramme de prédominance des formes du fer en fonction du pH et du potentiel d'oxydoréduction [26]

- **Sulfate d'Aluminium (Alun)**

Solubilité : Bien que soluble, le sulfate d'aluminium est moins efficace en milieu salin élevé car les ions Al^{3+} ont tendance à former des complexes avec les anions présents dans l'eau de mer, réduisant leur disponibilité pour la coagulation.[27]

Hydrolyse : L'alun hydrolyse pour former des espèces telles que Al(OH)^{2+} et Al(OH)_2^+ , mais en milieu salin élevé, ces espèces peuvent être moins stables. La formation d' Al(OH)_3 est moins efficace dans des conditions de forte salinité.[27]

pH Optimal : Le sulfate d'aluminium est le plus efficace dans une plage de pH allant de 5.5 à 6.5.

le pH influence significativement la charge de surface et la forme des coagulants ainsi que des impuretés. Pour les matières organiques d'origine humique et algogène, des valeurs de pH acides favorisent leur élimination par le mécanisme de neutralisation des charges. En ce qui concerne les cellules d'algues, elles sont efficacement coagulées dans une gamme de pH légèrement acide à neutre, grâce aux interactions avec les précipités d'hydroxyde du coagulant. Pour les particules inorganiques, un pH proche du neutre est préférable. [25]

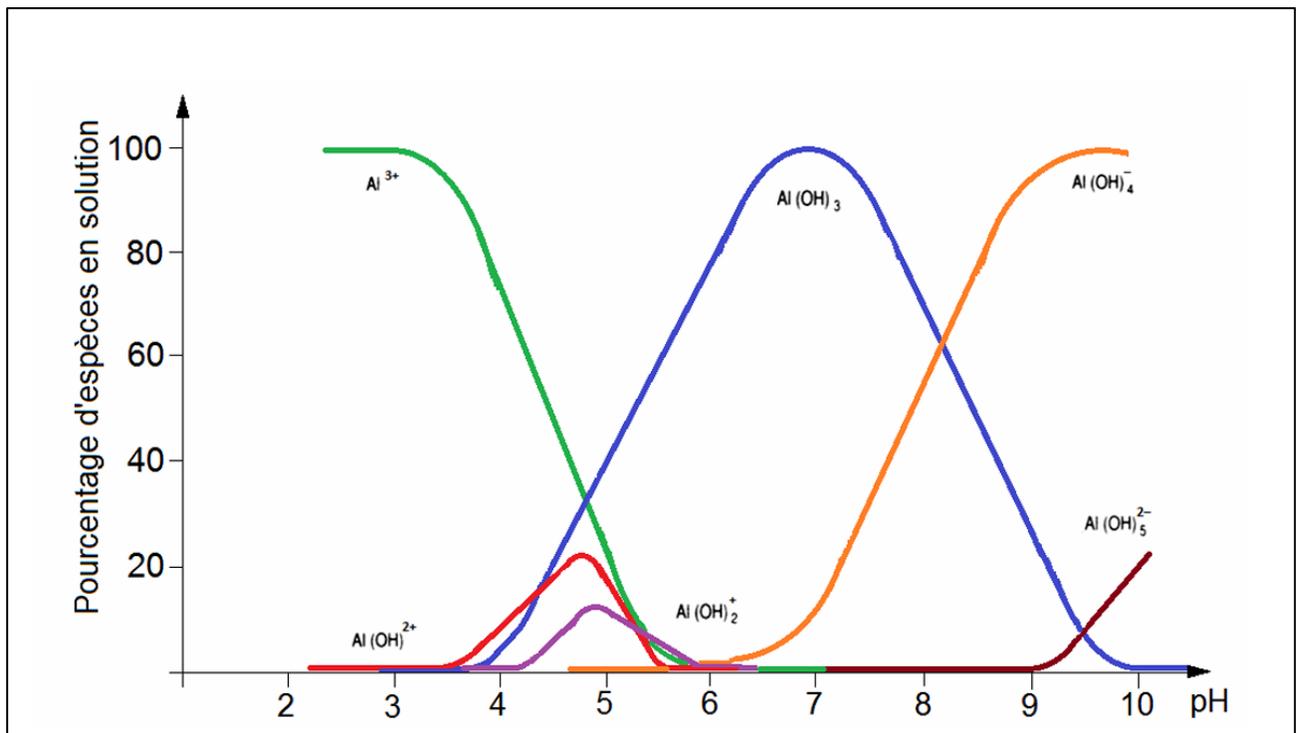


Figure 2-2 Répartition des produits d'hydrolyse du sulfate d'aluminium selon le pH [27]

2.2.2 Influence de la salinité

La salinité constitue un paramètre déterminant susceptible de modifier les interactions physico-chimiques essentielles dans les processus de traitement des eaux. Une concentration élevée en sels dissous peut influencer significativement sur l'efficacité des agents de coagulation et de floculation utilisés dans ces traitements. Les ions présents dans des eaux de nature saline, comme l'eau de mer, peuvent réduire l'efficacité des coagulants par des interactions compétitives, compromettant ainsi la formation des floes nécessaires à la clarification de l'eau. [28]

La capacité de coagulation du chlorure ferrique s'améliore avec l'accroissement de la salinité de l'eau. À une concentration de salinité de 2,0 g/L, le chlorure ferrique a montré une augmentation significative de l'efficacité d'élimination de la turbidité et des composés organiques, comparativement à des conditions de salinité moindre. Cette amélioration est attribuée à une meilleure déstabilisation des particules colloïdales sous des conditions de haute salinité, facilitant leur agglomération et leur précipitation. [29]

En revanche, l'efficacité de l'alun, un autre coagulant couramment utilisé, décroît avec l'augmentation de la salinité. À des niveaux élevés de salinité, l'alun devient moins performant pour la précipitation des impuretés. Cette diminution de l'efficacité est principalement due à des interactions ioniques qui interfèrent avec le mécanisme de coagulation de l'alun, entravant ainsi la formation efficace de floes. [29]

Ainsi, il est impératif de sélectionner des coagulants appropriés ou d'ajuster les paramètres du processus de traitement en fonction de la composition ionique spécifique de l'eau à traiter, pour assurer une élimination optimale des contaminants.

2.2.3 Influence de la température

L'impact de la température sur les processus de coagulation a été étudié par Cui et al. en 2020, qui ont observé que les basses températures prolongent les temps de réaction nécessaires à la formation efficace de floes. Cette observation est cruciale pour les traitements des eaux de mer, particulièrement

dans les climats variés où la température peut grandement influencer la performance des coagulants. [30]

Trois ans plus tard, une étude publiée par Springer en 2023 a approfondi cette question, mettant en lumière comment les températures réduites ralentissent les cinétiques de réaction, affectant ainsi la croissance et la stabilité des floes. Cette recherche a souligné la nécessité d'ajuster les paramètres du processus dans des conditions plus froides pour maintenir l'efficacité du traitement. [31]

Ces deux études montrent clairement que la température joue un rôle essentiel dans l'efficacité des techniques de coagulation et de floculation. La comparaison des résultats indique que, malgré le temps qui s'est écoulé entre les deux études, les conclusions restent cohérentes, renforçant la nécessité d'adapter les protocoles de traitement aux variations de température. Cela souligne l'importance de développer des systèmes de traitement de l'eau flexibles et adaptatifs, capables de répondre efficacement aux défis posés par les fluctuations thermiques environnementales.

2.3 Techniques et technologies avancées (usage de polymères, biopolymères, etc....)

2.3.1 Utilisation du ferrate liquide

L'utilisation de ferrate liquide réduit significativement la dose de fer nécessaire par rapport à la coagulation conventionnelle, avec une réduction de 10 fois la quantité de fer utilisée. Cette méthode a également abouti à une élimination plus importante de la turbidité et de la matière organique totale, tout en diminuant la production de boues sèches de 88%. Ces améliorations contribuent à une réduction notable des coûts opérationnels de 62% par rapport à la coagulation conventionnelle. L'utilisation de ferrate a aussi permis une meilleure élimination des micro-organismes, avec une suppression de plus de 99% de l'ATP total, indiquant une efficacité accrue dans la réduction de la biofouling potentielle. [32]

Ces résultats suggèrent que le ferrate liquide, en agissant à la fois comme coagulant, oxydant, et désinfectant, pourrait fournir une approche plus efficace et plus économique pour le prétraitement des installations de dessalement, surtout dans des conditions difficiles comme lors des floraisons algales nocives.

2.3.2 Développement de l'adoucissement et de la floculation ballastée comme procédé de prétraitement

La combinaison de l'adoucissement et de la floculation ballastée se révèle être une méthode de prétraitement efficace pour la désalinisation de l'eau de mer par osmose inverse. Cette technique se concentre sur l'élimination des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), principaux facteurs d'entartrage des membranes. L'adoucissement utilise un mélange de hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de carbonate de sodium (Na_2CO_3), qui a prouvé sa capacité à précipiter ces ions tout en minimisant la production de boues. La phase suivante, la floculation ballastée, implique l'utilisation de microsable et de flocculants polymères pour créer des floccs lourds qui se déposent rapidement, augmentant la vitesse de sédimentation à plus de 3,5 cm/s et améliorant la clarté de l'eau. Cette méthode ne réduit pas seulement le volume des boues mais garantit également que l'eau traitée atteint une qualité conforme aux normes des membranes d'osmose inverse, avec un indice de densité de sédimentation (SDI) inférieur à 3. En améliorant les propriétés de déshydratation des boues et en réduisant la fréquence de nettoyage des membranes, cette approche offre une solution durable et économique, augmentant la longévité et réduisant les coûts opérationnels des installations de dessalement. [33]

2.3.3 La technique de précipitation chimique

La technique de précipitation chimique oxo a été appliquée avec succès pour traiter les eaux de mer à haute turbidité. Cette méthode a utilisé des coagulants tels que le chlorure de fer (FeCl_3) et le chlorure de baryum (BaCl_2), ainsi que le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) comme oxydant. Les tests menés ont montré une réduction de la turbidité jusqu'à 90% et une diminution des concentrations de bore à moins de 0,5 mg/L. Ces résultats sont nettement inférieurs à la limite recommandée pour l'irrigation et la consommation humaine selon les normes internationales. [34]

2.3.4 La coagulation double de chitosan-alun/chlorure ferrique

L'utilisation du chlorure ferrique comme coagulant seul s'est révélée particulièrement efficace pour éliminer les microalgues de l'eau de mer, atteignant une efficacité de 98% avec un dosage de 20 ppm et un temps de sédimentation de 30 minutes. Par ailleurs, la combinaison de l'alun à 10 ppm et du chitosan à 1 ppm comme aides à la floculation a également permis d'atteindre une efficacité similaire dans l'élimination des microalgues, mais avec un temps de traitement réduit à 5 minutes. Ce dernier processus, comparable en efficacité à la flottation par air dissous, offre une alternative prometteuse pour le traitement rapide des eaux algales.[35]

2.3.5 Copolymères cationiques

Les polymères cationiques synthétisés ont démontré une capacité remarquable à réduire la turbidité des eaux de mer, avec une efficacité de plus de 85%. Cette performance est due à leur aptitude à neutraliser et agglomérer les particules négativement chargées telles que les argiles et les matières organiques dissoutes. En formant des floes efficaces, ces polymères réduisent significativement l'utilisation de produits chimiques et minimisent l'impact environnemental. Leur grande compatibilité avec les écosystèmes marins les rend particulièrement prometteurs pour les applications de pré-traitement dans les usines de dessalement. [36]

2.3.6 Polymères Synthétiques

- **Polyacrylamides Cationiques (CPAM)**

Les polyacrylamides cationiques (CPAM) se sont révélés efficaces dans le traitement des eaux de mer, en particulier après l'optimisation des conditions de synthèse pour ajuster leur degré de cationicité. Des suspensions de CPAM, composées de 50 % de poudre fine de CPAM, 46,87 % de solvant à base d'huile, 0,63 % d'agent de séparation, 1,56 % d'agent émulsifiant et dispersant, et 0,94 % de modificateur de rhéologie, ont maintenu une teneur effective de 50 %. Elles ont également démontré une stabilité remarquable, sans signes de séparation après sept jours de stockage à température ambiante ni lors d'une centrifugation de 30 minutes à 2000 tr/min. Dans les essais, ces suspensions

ont réduit la turbidité jusqu'à 99,50 % dans une eau simulée de diatomées à 1000 NTU, surpassant ainsi les 98,40 % atteints par le floculant inorganique chlorure d'aluminium polymérique (PAC). Ces performances supérieures suggèrent que les CPAM optimisés sont particulièrement adaptés pour une utilisation dans des environnements salins, offrant une alternative améliorée aux méthodes traditionnelles. [37]

- **PolyDADMAC**

L'application du polychlorure de diallyldiméthylammonium (PolyDADMAC) dans la coagulation améliorée des eaux marines a révélé des résultats prometteurs en termes de clarification de l'eau. Les tests effectués dans des conditions salines ont montré que le PolyDADMAC, à une concentration optimale, permettait de réduire la turbidité de l'eau de mer de 95% à 99%, surpassant ainsi les coagulants traditionnels dans des environnements similaires. L'efficacité du PolyDADMAC se maintenait même en présence de niveaux élevés de salinité, le rendant particulièrement adapté aux applications marines. Ces observations indiquent que le PolyDADMAC peut améliorer de manière significative la clarté de l'eau de mer, représentant une solution efficace et durable pour le traitement des eaux salines. [38]

2.3.7 Biopolymères : Alginate

Les alginates, biopolymères extraits des algues marines, ont été explorés pour leur potentiel en tant qu'agents floculants dans le traitement des eaux de mer, où ils ont affiché une efficacité de floculation comparable aux polymères synthétiques. Ces composés ont démontré une capacité significative à réduire la turbidité, atteignant des réductions de 85% à 90%, ce qui souligne leur efficacité dans la clarification des eaux marines. Par ailleurs, grâce à leur biodégradabilité et leur respect de l'environnement, les alginates constituent une alternative durable aux floculants synthétiques traditionnels. Leur provenance naturelle et leur faible impact écologique réduisent les risques écotoxicologiques associés à leur utilisation, rendant les alginates particulièrement adaptés pour des applications de traitement de l'eau respectueuses des écosystèmes marins. [39]

2.3.8 Polymères naturels modifiés

- **Amidon modifié**

L'amidon modifié a été évalué pour son efficacité en tant qu'agent de floculation dans des environnements salins, démontrant une performance supérieure à celle de l'amidon non modifié. Les modifications chimiques apportées à l'amidon, notamment par carboxyméthylation et hydroxypropylation, ont amélioré sa capacité à induire la formation de floccs, même en présence de concentrations élevées de sel. Ces traitements introduisent respectivement des groupes carboxyméthyle et hydroxypropyle sur les chaînes de glucose de l'amidon, augmentant ainsi sa solubilité et sa capacité à interagir avec les particules en suspension. Des tests comparatifs ont montré que l'amidon modifié pouvait réduire la turbidité de l'eau de mer de 80% à 95%, tandis que l'amidon non modifié ne parvenait qu'à obtenir des réductions de 60% à 70% sous des conditions analogues. Ces observations suggèrent que les propriétés floculantes de l'amidon modifié sont nettement améliorées, offrant ainsi une méthode plus efficace pour le traitement des eaux de mer. De plus, la compatibilité environnementale de l'amidon modifié accentue son potentiel comme solution durable pour les processus de traitement des eaux marines. [40]

- **Algues Traitées**

L'utilisation des algues rouges traitées en tant que flocculants naturels pour le traitement des eaux de mer a été évaluée, révélant une efficacité notable dans l'agglomération des particules fines. Les algues rouges traitées ont montré une capacité à réduire la turbidité de l'eau de mer de 75% à 90%, une performance qui surpasse celle des méthodes flocculantes conventionnelles. Les améliorations apportées aux propriétés naturelles des algues facilitent cette agglomération, proposant ainsi une solution à la fois écologique et efficace pour le traitement des eaux marines. Cette approche met en lumière le potentiel des matériaux naturels modifiés pour améliorer les processus de clarification dans des environnements marins. [41]

CHAPITRE 03 : DECANTATION ET SEPARATION DES FLOCS

3.1 Technologie et configuration des décanteurs utilisés dans le dessalement

3.1.1 Décanteurs lamellaires

L'efficacité des plaques inclinées, qui augmentent la surface de sédimentation, permet une séparation rapide et efficace des particules en suspension dans des décanteurs lamellaires, adaptés pour les applications nécessitant une clarification rapide et efficace dans des espaces limités.[42]

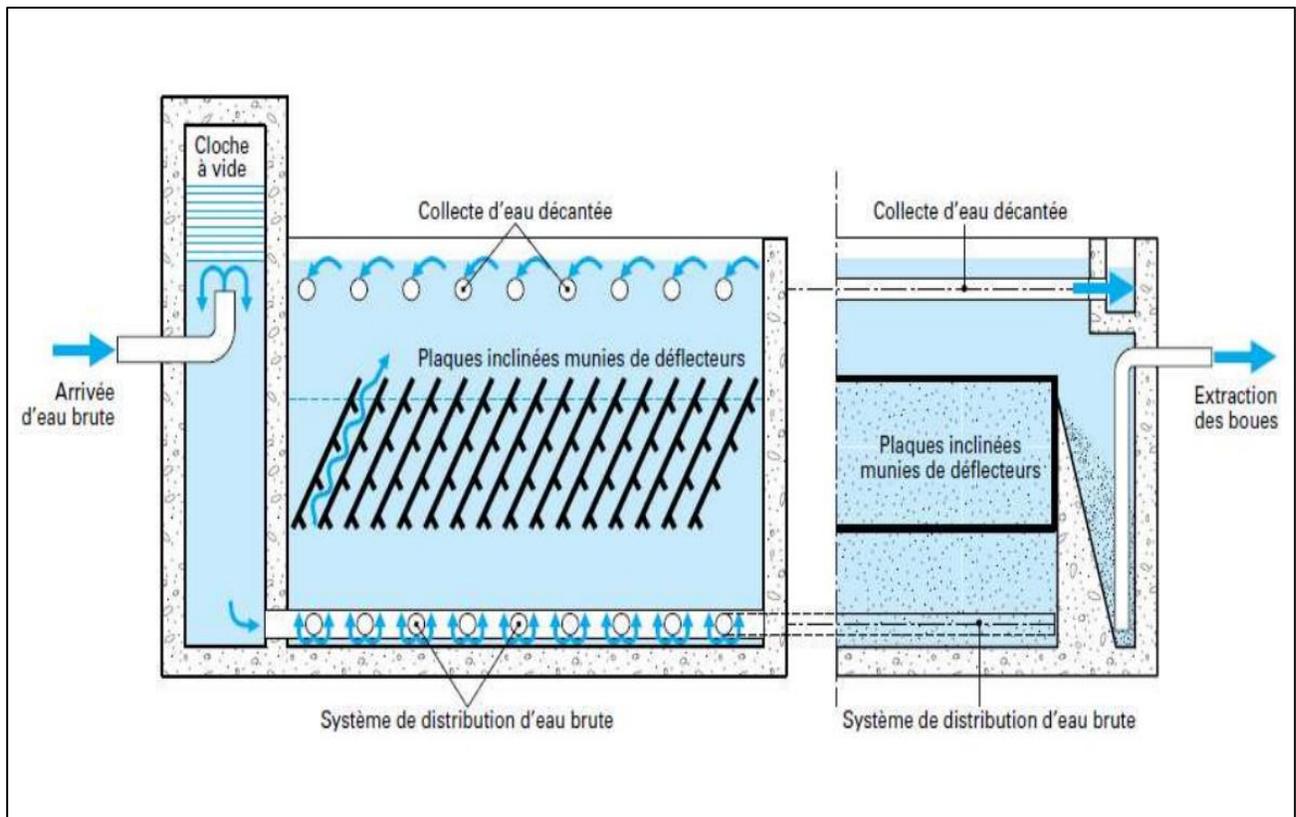


Figure 3-1 Schéma d'un décanteur lamellaire [43]

3.1.2 Décanteurs à flottation par air dissous (DAF)

Les systèmes DAF (Décanteurs à flottation par air dissous) fonctionnent en injectant de l'air sous forme de microbulles dans l'eau à traiter. Ces bulles s'attachent aux particules solides et les font flotter

à la surface, où elles sont ensuite raclées et retirées. Ils sont efficaces pour traiter l'eau brute avec une forte teneur en matières organiques, huiles, graisses, et algues, ainsi que pour améliorer la qualité de l'eau avant les étapes de filtration et d'osmose inverse. [44]

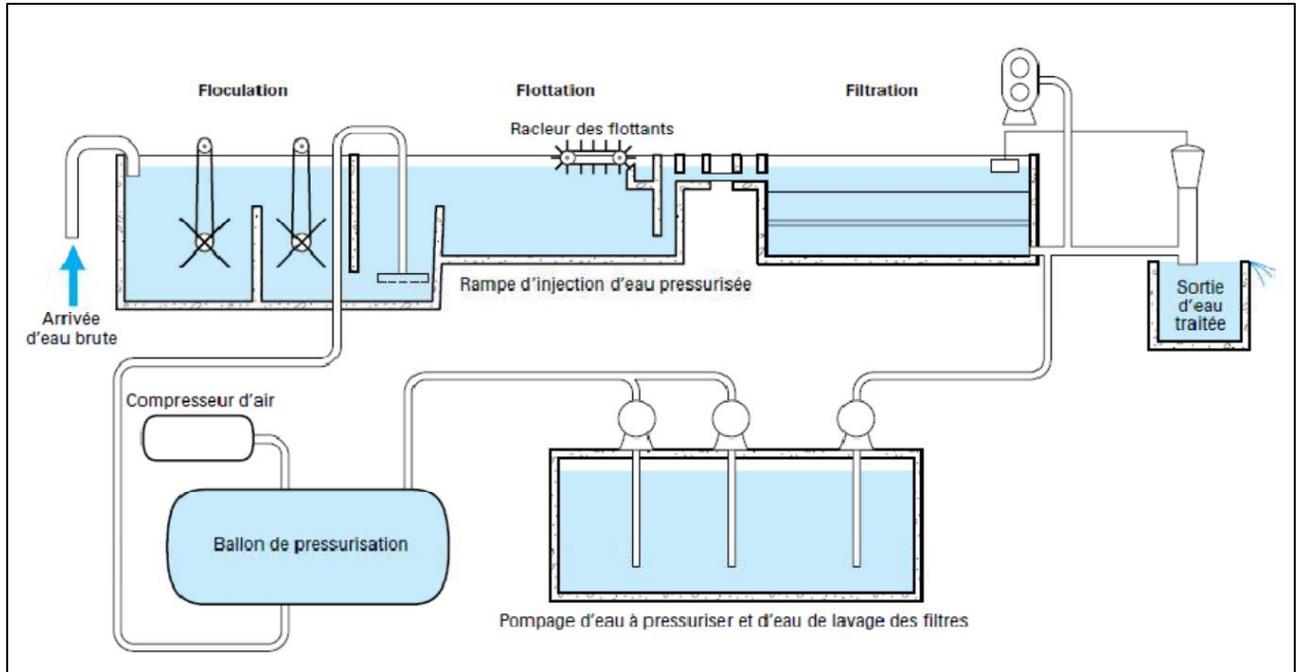


Figure 3-2 Schéma d'décanteur à flottation par air dissous [43]

3.1.3 Décanteurs centrifuges

Les décanteurs centrifuges sont essentiels lorsque la séparation des particules doit être extrêmement rapide et efficace. La force centrifuge permet de séparer rapidement les solides de l'eau, ce qui est crucial pour les installations traitant des eaux exceptionnellement chargées en solides, là où les méthodes conventionnelles de sédimentation seraient inadéquates ou trop lentes. [45]

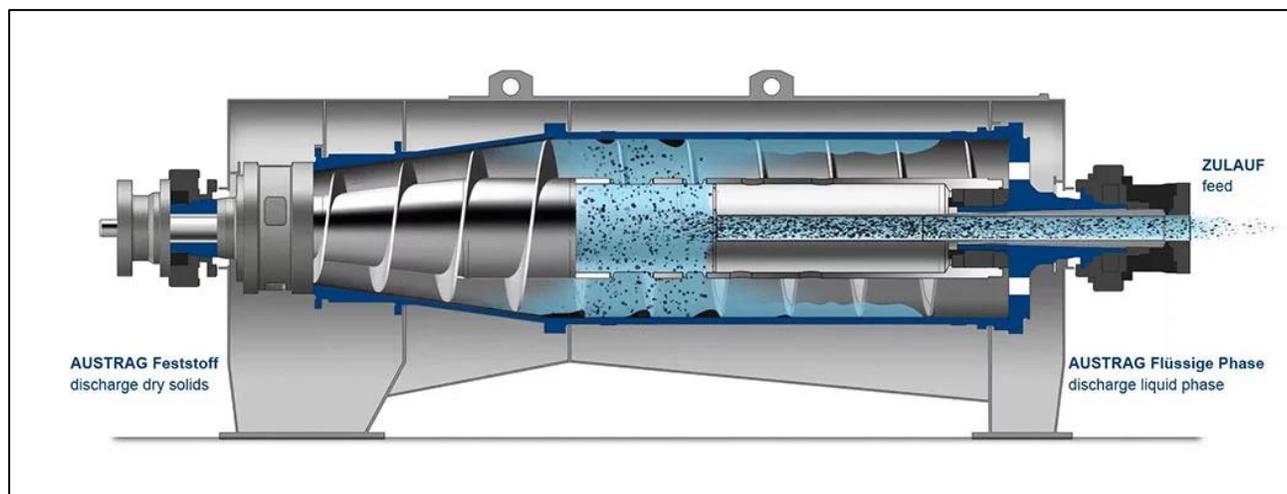


Figure 3-3 Schéma de fonctionnement d'un décanteur centrifuge avec séparation des solides et des liquides [46]

3.2 Impact de la qualité de l'eau du prétraitement de dessalement sur l'osmose inverse

Dans le domaine de la désalinisation par osmose inverse, la qualité de l'eau d'alimentation joue un rôle crucial pour l'efficacité opérationnelle et la durabilité des installations. Des facteurs tels que la turbidité, la concentration en matières organiques et la salinité influencent directement les coûts et la performance. À titre d'exemple, dans une installation californienne, il a été observé qu'une augmentation de la turbidité de 1 à 5 NTU peut entraîner une diminution de 15 % du débit de perméat et une augmentation de 20 % des coûts de maintenance. De plus, une teneur en matières organiques supérieure à 3 mg/L peut réduire la durée de vie des membranes de 30 %, tandis qu'une salinité élevée, de 35000 à 40000 ppm, peut accroître la consommation énergétique de 15 %. Les coûts de maintenance augmentent également de 18 % lorsque la concentration en particules dépasse 10 ppm. [47]

En ce qui concerne la localisation des prises d'eau, notamment dans la mer Rouge, l'utilisation de prises en eaux profondes pourrait minimiser le bioencrassement des membranes SWRO (Sea Water Reverse Osmosis) en réduisant les concentrations de particules exopolymères transparentes et d'autres substances organiques. Cependant, la qualité de l'eau varie avec la profondeur et, malgré des

réductions marginales de la turbidité et des TEP (Transparent Exopolymer Particles), la concentration en matières organiques reste élevée, nécessitant ainsi un prétraitement standard. L'installation de prises d'eau en profondeur présente des complexités et des risques liés à la topographie sous-marine abrupte et à l'activité sismique, ce qui peut augmenter les coûts de maintenance et compromettre la durabilité de l'installation.[48]

Ces défis, communs aux installations de dessalement, mettent en lumière la nécessité de sélectionner judicieusement l'emplacement des prises d'eau pour optimiser la performance tout en minimisant les risques et les coûts. Ces informations sont essentielles pour élaborer des stratégies de conception et d'exploitation plus efficaces et durables dans les installations de désalinisation par osmose inverse.

3.3 Optimisation des processus de décantation lamellaire pour le dessalement

3.3.1 Matériaux

Les avancées récentes dans les matériaux utilisés pour les lamelles dans les systèmes de décantation pour le traitement de l'eau de mer ont conduit à des améliorations significatives en termes de performance et de durabilité. L'accent est mis sur des matériaux qui offrent une meilleure résistance à la corrosion et à l'encrassement biologique, tout en optimisant l'efficacité du processus de décantation.

L'utilisation de matériaux photothermiques, tels que les nanocomposites à base de dioxyde de titane (TiO_2) et d'oxyde de graphène, permet de convertir efficacement l'énergie solaire pour favoriser l'évaporation de l'eau. Ces matériaux démontrent une grande résistance aux conditions corrosives présentes dans l'environnement marin, rendant ainsi les lamelles particulièrement adaptées pour les décanteurs lamellaires. [49]

Par ailleurs, l'emploi de polymères avancés et de composites pour les lamelles des clarificateurs a été rapporté. Les polymères tels que le polyéthylène haute densité (PEHD) et les composites renforcés de fibres de verre montrent une excellente résistance à la corrosion et à l'encrassement biologique. Ces matériaux contribuent à prolonger la durée de vie des systèmes de traitement de l'eau de mer et à réduire les coûts de maintenance. Ils sont également efficaces pour minimiser la formation de sous-produits de désinfection nocifs, améliorant ainsi la qualité globale de l'eau traitée. [50]

L'application des membranes d'ultrafiltration et l'utilisation de matériaux avancés pour les clarificateurs à lamelles ont également été explorées. Les polymères comme le polypropylène (PP) et les composites à base de carbone ont été identifiés comme particulièrement efficaces. Ces matériaux offrent une grande résistance à l'encrassement biologique et chimique, améliorant la performance des systèmes de décantation. L'intégration de technologies automatisées de nettoyage des lamelles a permis de réduire les coûts opérationnels et d'augmenter la durée de vie des installations, rendant le processus de traitement de l'eau de mer plus économique et fiable. [51]

3.3.2 Angle d'inclinaison et espacement optimaux

Des avancées significatives dans la conception des lamelles des décanteurs ont été réalisées, notamment l'optimisation de l'angle d'inclinaison et de l'espacement entre les lamelles pour améliorer l'efficacité de la décantation. Des recherches ont montré que des angles d'inclinaison de 55 à 60 degrés et un espacement de 2 à 3 cm sont optimaux, maximisant la surface de contact et évitant les blocages tout en maintenant un flux d'eau constant. [52]

Plus précisément, il a été démontré qu'un angle de 60 degrés avec un espacement de 2,5 cm peut améliorer le taux de sédimentation de 20 % par rapport aux configurations plus traditionnelles. Cette optimisation non seulement facilite une meilleure qualité de l'eau traitée mais réduit également la fréquence et la nécessité de maintenance. [53]

- **L'entretien des lamelles**

Les recherches sur l'intégration de technologies automatisées pour l'entretien des lamelles dans les systèmes de dessalement ont démontré des avancées significatives en matière de maintenance et d'efficacité opérationnelle. L'adoption de systèmes de nettoyage automatisé dans les installations de dessalement en Chine a révélé une augmentation de l'efficacité du traitement de l'eau de mer de 15 % à 25 %. Ces systèmes ont également permis de réduire les coûts de maintenance de 20 % à 30 % annuellement, grâce à la diminution de la fréquence des interventions de maintenance, renforçant ainsi la continuité opérationnelle et la durabilité des installations. [54]

Parallèlement, des résultats prometteurs ont été observés avec l'utilisation des clarificateurs à lamelles Escava équipés de technologies de nettoyage automatisé. Les analyses ont montré que ces systèmes peuvent réduire les interruptions de production de 25 % à 40 % et prolonger la durée de vie des lamelles de 20 %. Cette approche automatique du nettoyage élimine le besoin d'interventions manuelles fréquentes, améliorant ainsi la productivité et diminuant les coûts d'entretien. [55]

Enfin, l'introduction du système tubJet® dans les clarificateurs à lamelles a été soulignée comme une avancée majeure. Ce système, utilisant des jets d'eau à haute pression pour un nettoyage continu des lamelles, a entraîné une réduction de l'encrassement biologique et des dépôts minéraux. Il a été observé que le tubJet® réduit les arrêts de production de 30 %, optimisant ainsi la durabilité et l'efficacité des systèmes de dessalement par une réduction significative des coûts de maintenance et une amélioration du fonctionnement continu des installations. [56]

CHAPITRE 04 : ÉTUDE DE CAS DES STATIONS DE DESSALEMENT

4.1 Analyse de cas de stations de dessalement utilisant des technologies avancées

4.1.1 Efficacité de la micro-ultrafiltration dans l'amélioration du prétraitement du dessalement

La micro-ultrafiltration représente une technique avancée de filtration membranaire cruciale pour améliorer la qualité de l'eau en prétraitement du dessalement. Cette méthode implique l'utilisation de membranes dotées de pores extrêmement fins, variant de 0,01 à 0,1 micromètre, qui sont capables de retenir les particules fines, les colloïdes, ainsi que les bactéries et les virus, tout en permettant le passage de l'eau. Cette étape préalable améliore significativement l'efficacité des processus de dessalement subséquents, notamment l'osmose inverse.

Des études de cas illustrent bien l'efficacité de cette technologie. À la station de dessalement d'Alicante en Espagne, l'intégration de la micro-ultrafiltration avant l'osmose inverse a permis une réduction de 90% de la turbidité de l'eau d'alimentation, ce qui a entraîné une augmentation de 30% de la durée de vie des membranes d'osmose inverse. Ces améliorations ont simultanément réduit les coûts de maintenance et augmenté l'efficacité globale du système. [57]

De même, la station de dessalement de Perth en Australie a bénéficié de l'intégration de la micro-ultrafiltration comme prétraitement. Les résultats ont été remarquables, avec une amélioration de la qualité de l'eau produite et une réduction des coûts d'exploitation de 15%. L'impact a été significatif, prolongeant la durée de vie des membranes d'osmose inverse et réduisant la fréquence des arrêts pour maintenance. [58]

Ces exemples démontrent clairement comment la micro-ultrafiltration, en éliminant efficacement les contaminants avant le dessalement, joue un rôle essentiel dans la préservation des équipements de dessalement et la réduction des coûts opérationnels, tout en garantissant une qualité d'eau supérieure pour le traitement ultérieur.

4.1.2 Efficacité de la distillation membranaire dans l'amélioration du prétraitement du dessalement

La distillation membranaire (DM) est une technique de séparation membranaire avancée, essentielle pour améliorer l'efficacité du dessalement de l'eau. Cette méthode utilise une membrane hydrophobe perméable à la vapeur, permettant le passage de la vapeur d'eau tout en retenant les impuretés et les sels dissous. La distillation membranaire repose sur la différence de pression de vapeur entre les deux côtés de la membrane, ce qui permet la vaporisation de l'eau d'un côté et sa condensation de l'autre. Cette approche innovante optimise les processus de dessalement, notamment par osmose inverse, en offrant une meilleure qualité de l'eau d'alimentation.

Le projet de dessalement de la mer de Marmara en Turquie a utilisé la distillation membranaire pour traiter l'eau de mer. Six membranes commercialement disponibles ont été testées pour évaluer les effets de diverses conditions de fonctionnement, telles que le débit transversal, le type de membrane, la taille des pores, les températures des solutions et les différences de température à travers la membrane, sur les performances du processus de distillation membranaire à contact direct (DCMD). [59]

Les résultats ont montré un taux de rejet des solutés de 99,93 %, garantissant que l'eau produite respectait les normes pour la consommation humaine directe. Le flux de perméat enregistré était de 17,2 L/m²h dans des conditions optimales. Le processus de la distillation membranaire a réussi à concentrer l'eau de mer brute d'environ 70 %, démontrant son efficacité pour réduire la salinité et produire de l'eau potable de haute qualité. [59]

Les avantages de ce projet incluent la production d'eau de haute pureté, l'efficacité énergétique due aux températures et pressions de fonctionnement plus basses par rapport à l'Osмосe inverse, et la possibilité de mise à l'échelle de la technologie de la distillation membranaire pour des applications pratiques dans les usines de dessalement. [59]

Une unité pilote DCMD (Distillation Membranaire à Contact Direct) a été testée dans la région du GCC (Conseil de Coopération du Golfe) pour traiter de la saumure hautement salée. Le système

utilisait une membrane commerciale en polyéthylène et fonctionnait sous diverses conditions de salinité pour évaluer ses performances à long terme et son efficacité énergétique. [60]

Les résultats ont montré des taux de rejet de sel allant jusqu'à 95,6 % avec une alimentation hautement salée (75 500 ppm) et 98 % avec une alimentation modérément salée (25 200 ppm). L'unité pilote a maintenu un taux de récupération de flux élevé de 95 % après 100 heures de fonctionnement. La consommation d'énergie thermique spécifique a été optimisée, atteignant une réduction de 10 % dans des conditions de fonctionnement stables.[60]

Les avantages de cette unité incluent la durabilité, démontrant la capacité à traiter la saumure hautement salée et à réduire l'impact environnemental de l'élimination de la saumure. La stabilité opérationnelle montre que le système peut fonctionner à long terme dans des applications industrielles, et l'efficacité énergétique réduite met en évidence le potentiel de la technologie de la distillation membranaire à réduire les coûts opérationnels par rapport aux méthodes de dessalement conventionnelles. [60]

La technologie de la distillation membranaire offre des avantages significatifs dans le domaine de la désalinisation, notamment la production d'eau de haute pureté, l'efficacité énergétique et la stabilité opérationnelle. Les études de cas de la mer de Marmara et de la région du GCC (Conseil de Coopération du Golfe) démontrent les applications pratiques et les avantages de la distillation membranaire, la positionnant comme une alternative prometteuse aux techniques de dessalement traditionnelles. Avec la poursuite de la recherche et du développement, la technologie la distillation membranaire est prête à jouer un rôle crucial dans la résolution des défis mondiaux liés à la rareté de l'eau.

4.1.3 Efficacité de l'osmose directe dans l'amélioration du dessalement

L'osmose directe (OD) est une technique de séparation membranaire innovante. Cette méthode utilise une membrane semi-perméable qui permet le passage de l'eau depuis une solution à faible concentration vers une solution à haute concentration en solutés, sans nécessiter de pression élevée.

Les îles Canaries, en particulier Gran Canaria, font face à des défis significatifs pour sécuriser de l'eau potable en raison des ressources limitées en eau douce. Un projet pilote à Gran Canaria utilise des membranes d'osmose directe pour réutiliser la saumure d'une installation locale de désalinisation de l'eau de mer. Le projet, mené par l'Institut technologique des Canaries (ITC) et l'Université de Las Palmas de Gran Canaria, vise à produire de l'eau pour l'irrigation en diluant la saumure avec des effluents traités d'une station d'épuration municipale. [61]

Cette approche innovante réduit significativement la consommation d'énergie par rapport à l'osmose inverse, car elle repose sur la pression osmotique naturelle plutôt que sur des pompes à haute pression. Le projet pilote a démontré une réduction potentielle de la consommation d'énergie allant jusqu'à 30%. En combinant deux flux de déchets — la saumure et les effluents traités — le projet favorise l'efficacité des ressources et la durabilité, économisant environ 1 000 mètres cubes d'eau douce par an. De plus, le système a atteint un taux de récupération de l'eau supérieur à 85%, produisant avec succès de l'eau adaptée à l'usage agricole et démontrant le potentiel pour une application à grande échelle dans des régions arides similaires.

Trevi Systems a développé une usine de désalinisation par osmose directe au Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority (NELHA). Cette usine de 500 m³/jour intègre un réseau thermique solaire de 2 MW pour fournir la chaleur nécessaire au processus d'osmose directe, visant une désalinisation sans carbone. L'eau désalinisée est utilisée à des fins agricoles par Cyanotech, une entreprise produisant des produits de santé et de nutrition à partir de microalgues. [62]

L'utilisation de l'énergie solaire pour le processus d'osmose directe élimine l'empreinte carbone, rendant le système écologiquement durable. L'usine fonctionne entièrement à l'énergie renouvelable, réduisant les émissions de CO₂ de 1 200 tonnes par an. L'intégration de solutions de stockage d'énergie permet une opération continue, même pendant les périodes non ensoleillées, garantissant une alimentation en eau stable. Les données préliminaires suggèrent que le coût de l'eau désalinisée est compétitif avec les méthodes traditionnelles d'osmose inverse, avec des projections montrant des coûts aussi bas que 0,50 \$ par mètre cube, contre 0,60 à 1,20 \$ pour les méthodes conventionnelles. Cette

rentabilité, combinée aux avantages environnementaux, fait de l'usine de Trevi Systems un modèle de désalinisation durable. [62]

Modern Water a mis en place des systèmes de désalinisation par osmose directe à Oman, notamment à Al Najdah et Al Khaluf. Ces usines ont été commandées pour fournir de l'eau potable en utilisant la technologie de l'osmose directe, tirant parti de ses faibles besoins énergétiques et de ses caractéristiques anti-encrassement. [63]

Les systèmes d'osmose directe à Oman fonctionnent avec des besoins énergétiques inférieurs par rapport aux méthodes de désalinisation conventionnelles, ce qui entraîne des économies de coûts et un impact environnemental réduit. La consommation d'énergie pour ces systèmes est rapportée être de 50 à 70 % inférieure à celle des systèmes d'osmose inverse traditionnels. Les membranes d'osmose directe présentent des taux d'encrassement plus faibles, ce qui se traduit par des coûts de maintenance inférieurs et une durée de vie prolongée des membranes, nécessitant un nettoyage seulement deux fois par an, contre des nettoyages mensuels pour les membranes d'osmose inverse. Les usines atteignent des taux de récupération de l'eau élevés, dépassant 90%, assurant une source d'eau potable fiable dans des environnements difficiles. Cette source d'eau durable est cruciale pour les communautés locales, démontrant les avantages pratiques de l'osmose directe dans des conditions difficiles. [63]

La technologie de l'osmose directe offre des avancées prometteuses dans le domaine de la désalinisation, apportant des améliorations significatives en termes d'efficacité énergétique, de durabilité et de rentabilité. Les études de cas à Gran Canaria, Hawaï et Oman démontrent les applications pratiques et les avantages de l'osmose directe, ouvrant la voie à une adoption plus large dans les régions confrontées à la rareté de l'eau.

4.1.4 Efficacité des procédés hybrides dans l'amélioration du dessalement

Les procédés hybrides de dessalement combinent diverses technologies de séparation membranaire et thermique pour améliorer l'efficacité de la désalinisation de l'eau. Ces systèmes sont conçus pour optimiser la qualité de l'eau d'alimentation, réduire les coûts énergétiques et prolonger la durée de vie

des équipements. Cet article examine plusieurs stations de dessalement réelles qui utilisent ces procédés hybrides, mettant en lumière leurs performances et avantages.

À Gibraltar, une usine pilote a intégré la nanofiltration (NF) comme prétraitement avant l'osmose inverse (OI). La nanofiltration est utilisée pour éliminer les particules et réduire la charge de salinité avant que l'eau n'atteigne les membranes d'osmose inverse. Cette approche permet d'augmenter le flux et le taux de récupération tout en réduisant le taux de remplacement des membranes. Les résultats montrent une amélioration significative du flux d'eau à travers les membranes d'osmose inverse, ainsi qu'une augmentation de 20 à 30 % de la durée de vie des membranes, ce qui réduit les coûts de maintenance. De plus, la qualité de l'eau produite a été améliorée, répondant aux normes de consommation humaine directe. [64]

À Ras Al-Khaimah, un système hybride combinant l'osmose inverse avec l'ultrafiltration (UF) a été mis en œuvre. L'ultrafiltration est utilisée comme prétraitement pour éliminer les contaminants avant que l'eau n'atteigne les membranes d'osmose inverse. Cette intégration a permis une réduction de 75 % de la charge en contaminants de l'eau d'alimentation. En conséquence, la durée de vie des membranes d'osmose inverse a été augmentée de 35 %, ce qui réduit les coûts de maintenance. En outre, l'intégration de l'ultrafiltration a conduit à une amélioration de l'efficacité énergétique du système global, démontrant l'efficacité des procédés hybrides pour améliorer les performances des installations de dessalement. [65]

La station de dessalement de Barcelone utilise un procédé hybride combinant l'osmose directe et l'osmose inverse. Ce type de combinaison permet de réduire la turbidité de l'eau d'alimentation et d'améliorer la qualité de l'eau produite. Les résultats montrent une réduction de 40 % de la turbidité et une amélioration notable de la qualité de l'eau. Cette technologie a également permis de réduire les coûts d'exploitation de 20 % et de prolonger la durée de vie des membranes d'osmose inverse, réduisant ainsi la fréquence des arrêts pour maintenance. Ces résultats démontrent le potentiel des procédés hybrides pour optimiser l'efficacité des systèmes de dessalement tout en réduisant les coûts opérationnels et environnementaux. [66]

Les procédés hybrides de dessalement offrent des avantages significatifs en termes d'amélioration de la qualité de l'eau, de réduction des coûts et de prolongation de la durée de vie des équipements. Les études de cas des stations de Gibraltar, de Ras Al-Khaimah et de Barcelone démontrent l'efficacité de ces systèmes et leur potentiel pour une adoption plus large. Ces exemples illustrent comment les technologies hybrides peuvent répondre aux défis mondiaux liés à la rareté de l'eau tout en assurant la durabilité environnementale.

4.2 Efficacité, coûts opérationnels, et impacts environnementaux

4.2.1 Capacité et efficacité énergétique

Ultrafiltration (UF) :

- Capacité et Efficacité : L'ultrafiltration est très efficace pour éliminer les particules fines et les microorganismes, améliorant ainsi la performance des systèmes d'osmose inverse (OI) en réduisant le colmatage des membranes. [67]
- Consommation Énergétique : Modérée. Requiert moins d'énergie que les procédés thermiques et convient bien comme prétraitement avant l'osmose inverse. [67]

Microfiltration (MF) :

- Capacité et Efficacité : Efficace pour enlever les particules en suspension et certains microorganismes, mais moins performante que l'ultrafiltration pour les contaminants de plus petite taille [67]
- Consommation Énergétique : Relativement faible, adaptée pour des eaux avec des niveaux modérés de matières en suspension. [67]

Osmose directe (OD) :

- Capacité et Efficacité : L'osmose directe est efficace pour des projets à petite échelle où la consommation énergétique doit être minimisée. Elle utilise une différence de concentration

pour déplacer l'eau à travers une membrane, nécessitant moins de pression que l'osmose inverse.

- Consommation Énergétique : Très faible comparée aux autres technologies de dessalement, ce qui en fait une option viable pour les installations à faible budget énergétique. [68]

Distillation multi-étagée (MED) :

- Capacité et Efficacité : Appropriée pour des applications à grande échelle où la qualité de l'eau est critique. La distillation multi-étagée utilise plusieurs étapes de distillation pour produire de l'eau de haute pureté.
- Consommation Énergétique : Modérée à élevée. Cependant, les installations la distillation multi-étagée peuvent intégrer des systèmes de cogénération pour améliorer l'efficacité énergétique globale. [69]

4.2.2 Coûts opérationnels

Ultrafiltration (UF) :

- Coûts : Les coûts opérationnels sont modérés, influencés par la nécessité de nettoyer régulièrement les membranes pour éviter le colmatage. Les membranes UF ont une durée de vie moyenne à longue, réduisant les coûts de remplacement. [67]
- Maintenance : La maintenance inclut le nettoyage chimique périodique et le remplacement des membranes, ce qui peut augmenter les coûts opérationnels sur le long terme. [67]

Microfiltration (MF) :

- Coûts : Moins élevés que ceux de l'ultrafiltration en termes de remplacement de membranes et de nettoyage. Convient bien pour les installations avec des budgets limités. [67]
- Maintenance : Similaire à l'ultrafiltration, mais moins intensive en termes de fréquence de nettoyage et de remplacement des membranes. [67]

Osmose directe (OD) :

- Coûts : Les coûts opérationnels de l'osmose directe sont les plus bas parmi les technologies de dessalement en raison de sa faible consommation énergétique et de ses besoins en maintenance réduits.
- Maintenance : La maintenance inclut principalement le nettoyage des membranes et la gestion des solutions de tirage, qui sont moins coûteuses comparées aux autres méthodes de dessalement. [68]

Distillation multi-étagée (MED) :

- Coûts : Les coûts opérationnels sont plus élevés en raison de la consommation énergétique importante et de la complexité des équipements. Cependant, ces coûts peuvent être compensés par des systèmes de cogénération et des économies d'échelle.
- Maintenance : Exige une maintenance régulière pour assurer l'efficacité des multiples étages de distillation, ce qui peut augmenter les coûts opérationnels. [69]

4.2.3 Impacts environnementaux

Ultrafiltration (UF) :

- Impact : Relativement faible en termes de consommation d'énergie et de rejets chimiques. Les membranes doivent être éliminées de manière appropriée pour éviter la pollution.
- Rejets de Saumure : Gérés efficacement grâce à des technologies avancées de traitement. [67]

Microfiltration (MF) :

- Impact : Similaire à l'ultrafiltration, mais avec une empreinte énergétique légèrement plus faible. Les impacts environnementaux sont modérés et dépendent de la gestion des membranes usagées.
- Rejets de Saumure : Moins problématique que les méthodes thermiques, mais nécessitent toujours une gestion appropriée. [67]

Osmose directe (OD) :

- Impact : L'osmose directe a un impact environnemental relativement faible en raison de sa faible consommation énergétique. Les rejets de saumure sont généralement gérés de manière efficace grâce aux technologies avancées de traitement.
- Rejets de Saumure : Les rejets sont moins volumineux et peuvent être traités avec des impacts environnementaux réduits. [68]

Distillation multi-étagée (MED) :

- Impact : Bien que la distillation multi-étagée puisse produire de l'eau de très haute qualité, elle nécessite des solutions pour gérer les impacts thermiques et les émissions de CO₂ associés à la consommation énergétique élevée.
- Rejets de Saumure : La gestion des rejets thermiques et chimiques est cruciale pour minimiser les impacts environnementaux. [69]

4.3 Évaluation de l'empreinte carbone des stations de dessalement Algériennes

L'Algérie, avec son littoral de 1200 km, possède 23 grandes stations de dessalement opérationnelles utilisant principalement la technologie de l'osmose inverse. La capacité totale de dessalement est d'environ 4,5 millions de m³/jour, ce qui représente environ 42% de la consommation en eau potable du pays.

4.3.1 Consommation énergétique et émissions de CO₂

- **Kahrama, Oran** : Capacité de 90 000 m³/jour. Émissions de CO₂ avec utilisation de gaz naturel : 190 890 kg/jour ; avec énergie solaire : 22 320 kg/jour ; avec énergie éolienne : 9 810 kg/jour.
- **El Hamma, Alger** : Capacité de 200 000 m³/jour. Émissions de CO₂ avec gaz naturel : 424 200 kg/jour ; avec énergie solaire : 49 600 kg/jour ; avec énergie éolienne : 21 800 kg/jour.

- **Magtaa** : Capacité de 500 000 m³/jour. Émissions de CO₂ avec gaz naturel : 1 060 500 kg/jour ; avec énergie solaire : 124 000 kg/jour ; avec énergie éolienne : 54 500 kg/jour. [70]

Impact total : En 2022, les 11 stations de dessalement en Algérie ont généré environ 4 475 310 kg de CO₂ par jour avec l'utilisation de gaz naturel. La prévision pour 2030, avec une capacité augmentée à 6 200 000 m³/jour, est une production de 13 150 200 kg de CO₂ par jour. [70]

4.3.2 Initiatives de réduction des émissions

Les initiatives de réduction des émissions dans le secteur du dessalement intègrent diverses stratégies pour minimiser l'impact environnemental, structurées de manière concise comme suit :

- **Optimisation énergétique** : Utilisation de membranes avancées et de systèmes de récupération d'énergie pour améliorer l'efficacité énergétique des installations.
- **Utilisation d'énergies renouvelables** : Intégration de l'énergie solaire et éolienne, réduisant considérablement les émissions de CO₂, avec des réductions significatives des émissions à la station d'El Hamma.
- **Technologies avancées** : Adoption de membranes nanostructurées pour optimiser la performance énergétique et réduire les coûts opérationnels.
- **Gestion environnementale** : Développement de plans de gestion environnementale pour minimiser l'impact des rejets salins et thermiques sur la vie marine. Ces mesures contribuent collectivement à une exploitation plus durable et économique des stations de dessalement. [70]

CHAPITRE 05 : AMELIORATION DU PRETRAITEMENT DE LA STATION DE DESSALEMENT DE TENES

5.1 Présentation de la zone d'étude

5.1.1 La zone géographique

La commune de Ténès couvre une superficie totale de 92,28 km², dont 5,70 km² sont des zones urbaines et 86,58 km² des zones rurales. Elle est délimitée comme suit :

- Au Nord : la mer Méditerranée
- Au Sud : les communes de Sidi Akkacha et Abou El-Hassan
- À l'Est : Oued Goussine
- À l'Ouest : la commune de Sidi Abderahmane [71]

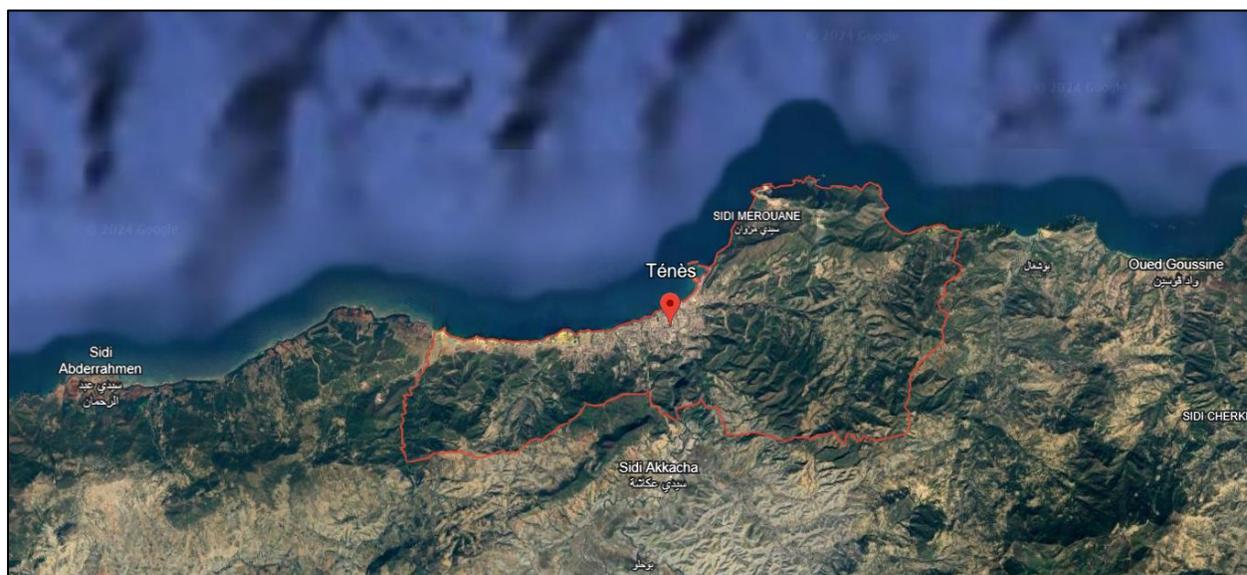


Figure 5-1 Carte satellite de la région de Ténès, Algérie [72]

5.1.2 Le climat

L'importance du climat est particulièrement significative dans le cadre de projets de dessalement des eaux de mer. En effet, le climat influence directement le fonctionnement des procédés de

dessalement et affecte également le choix du site d'implantation. Les variations climatiques peuvent impacter la disponibilité des ressources en eau, l'efficacité des technologies de dessalement, et les coûts opérationnels. Ainsi, une analyse climatique rigoureuse est essentielle pour optimiser la performance et la durabilité des installations de dessalement.[71]

La ville de Ténès se situe dans une zone climatique semi-aride, caractérisée par une pluviométrie annuelle moyenne de 585 mm.

Le climat de Ténès se divise en deux principales périodes :

- **Période humide** : Cette période s'étend sur neuf mois, de septembre à mai.
- **Période sèche** : Les mois de juin, juillet et août.

Les températures moyennes annuelles à Ténès sont de 17,7°C. Les variations saisonnières de température sont notables :

- **Été** : Les mois les plus chauds s'étendent de juin à septembre, avec des températures moyennes dépassant les 20°C.
- **Hiver** : La saison froide s'étend de décembre à février, avec des températures moyennes d'environ 13°C. [71]

Les vents dominants dans la région proviennent principalement du nord, avec une répartition sectorielle de 22% au nord-est, 12% au nord et 27% au nord-ouest. Les vitesses moyennes mensuelles des vents sont d'environ 3 m/s, montrant peu de variations au fil des mois (avec des minima à 2,5 m/s et des maxima à 3,2 m/s), selon les données enregistrées par la station météorologique de Sidi Akkacha pour la période de 1993 à 2010. [71]

5.2 Situation géographique et la topographie de la station de dessalement

Le site de l'usine de dessalement d'eau de mer existante à Ténès est situé dans la wilaya de Chlef, précisément dans la daïra et la commune de Ténès, à l'entrée ouest de la ville, au lieu-dit «Mainis»,

à sept kilomètres du chef-lieu de la commune. Ce site est également localisé à cinquante-deux kilomètres à l'est du chef-lieu de wilaya et à environ cent dix kilomètres à l'ouest de la wilaya de Tipaza, avec un accès direct via la route nationale RN°11 qui relie Mostaganem à Tipaza.

L'usine occupe un terrain de huit hectares, bordé au nord par la mer Méditerranée, au sud par la route nationale N°11, à l'ouest par une ancienne petite unité de dessalement de 5000 m³ de capacité, exploitée par des Espagnols, et à l'est par les habitations de Mainis. [73]

En termes de topographie, l'élévation du terrain varie de 2,5 mètres à 16 mètres, depuis la route nationale RN°11 jusqu'à la limite du site.

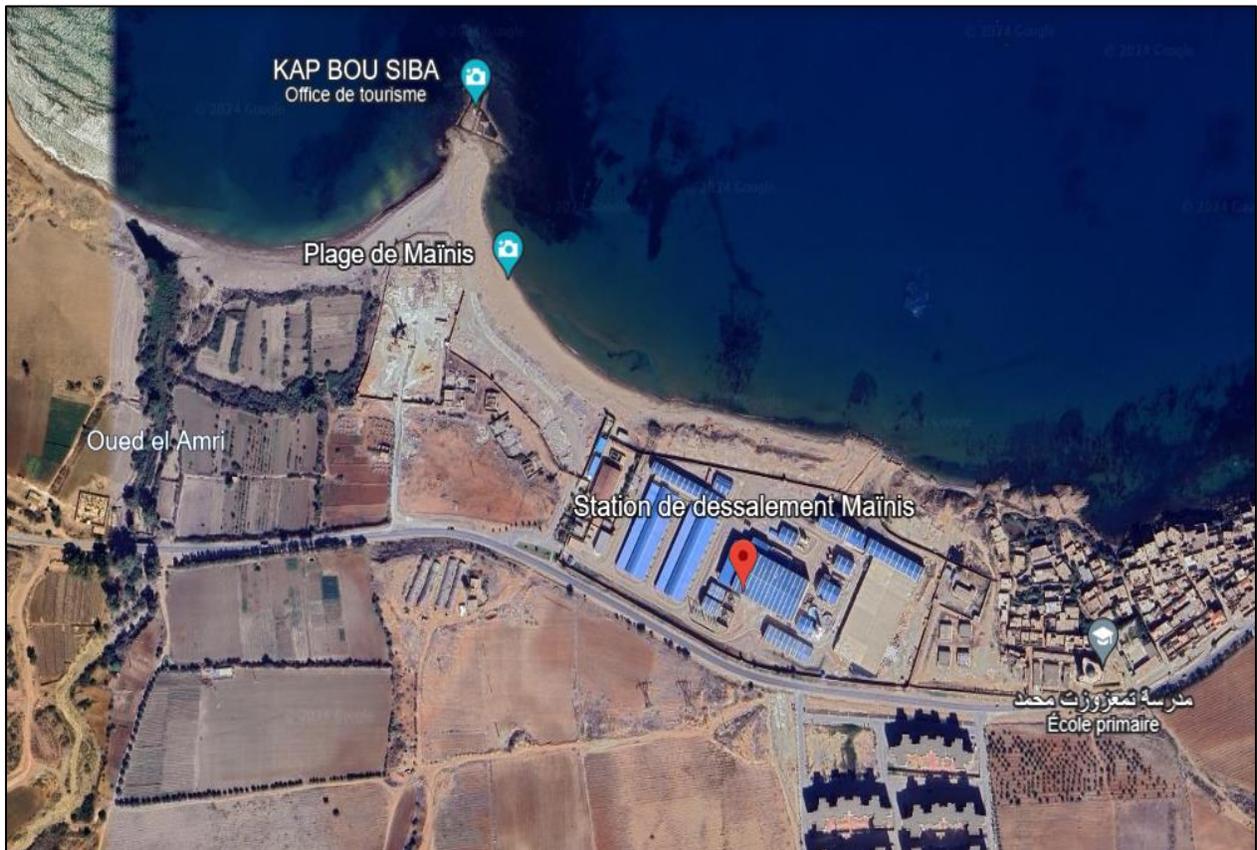


Figure 5-2 Vue satellite de la station de dessalement de Ténès, Algérie [72]

5.3 Capacité de production de l'usine

L'usine de dessalement possède une capacité nominale de production de 200 000 m³ par jour. Elle se compose de douze unités identiques, chacune ayant une capacité de production nette d'eau dessalée de 17 391 m³ par jour, avec un taux de conversion de 45 %. Le débit conceptuel total généré par ces douze unités atteint 208 696 m³ par jour, ce qui permet d'assurer une production continue de 200 000 m³ par jour, y compris lors du processus de lavage de chaque sous-unité.

En outre, une surproduction de 1 % est anticipée pour répondre aux besoins de consommation interne de l'usine, ce qui correspond à un débit total de captage de 468 406 m³ par jour. [73]

5.4 Caractéristiques techniques de l'usine de dessalement d'eau de mer de la ville de Ténès

- Production d'eau Commercialisable : 200000 m³/jour
- Processus de dessalement : Osmose inverse
- Conversion du système : 45 %
- Nombre d'Unités : 12
- Débit de chaque unité : 17391 m³/jour
- Salinité de l'eau au Point de Livraison : < 500 ppm
- Type de prise d'eau de mer : Emissaire sous-marin
- Type de décharge de saumure : Emissaire sous-marin
- Prétraitements physiques : Pre-Filtration, coagulation-floculation, filtres à sable anthracite et filtres à cartouche.
- Prétraitements chimiques : Hypochlorite de sodium, chlorure ferrique, polyélectrolyte, dioxyde de carbone, métabisulfite de sodium, Hydroxyde de sodium et inhibiteur de corrosion.
- Pompes à haute pression : Centrifuge horizontale
- Système de récupération d'énergie : Chambres hyperbariques modèle PX-260 de ERI
- Post-traitement du produit : Lait de chaux, CO₂ et hypochlorite de sodium.
- Tuyauteries à basse pression : Polyester renforcé de fibre de verre (PRFV)

- Tuyauteries à haute pression : Acier inoxydable qualité SS316 et duplex.

5.5 Caractéristiques de l'eau à traiter

Tableau 5-1 Paramètres de Qualité de l'Eau de Mer de la Station de Dessalement de Ténès, Algérie [73]

Paramètres	Unités	Valeurs minimales	Valeurs maximales
Température (°C)	C°	14	26
Total des Matières Solides Dissoutes (TDS) (ppm)	ppm	35000	39000
Total des Matières Solides en Suspension (TSS) (ppm)	ppm	1	10
Pétrole et hydrocarbures (ppm)	ppm	N/A	< 0,05
Chlorure (ppm)	ppm	19000	22000
Calcium (ppm)	ppm	N/A	490
Sulfate (ppm)	ppm	N/A	3200
Strontium (ppm)	ppm	N/A	10
Barium (ppm)	ppm	N/A	3
Magnésium (ppm)	ppm	N/A	1550
Bores (ppm)	ppm	N/A	5

5.6 Caractéristiques de l'eau destinée à la consommation humaine (DCHU)

Les valeurs garanties pour l'eau traitée seront conformes aux paramètres suivants :

- pH : 7,0 - 8,5
- Indice de Langelier : 0 - 0,4
- Alcalinité : 60 ppm de CaCO₃ (valeur minimale)

- Dureté totale : 80 ppm <DT< 150 ppm de CaCO₃
- Matière totale Dissoute : 150 < MTD< 500 ppm
- Bore : ≤ 1 mg/l (valeur annuelle moyenne)

5.7 Processus de dessalement TENES

5.7.1 La prise en mer (Intake)

La capacité nécessaire de captage pour la production de l'usine est déterminée à 468 406 m³ par jour. Le prélèvement de l'eau de mer s'effectue via deux conduites marines, chacune d'un diamètre de 1 800 mm, reposant sur le fond marin. La capacité maximale de captage est établie à 540 000 m³ par jour, représentant ainsi une capacité excédentaire de 13,26 %.

À l'extrémité de chaque conduite de captage, une tour de captage est installée avec pour objectif d'aspirer l'eau à une profondeur comprise entre 8 et 10 mètres et à une distance de 500 mètres du rivage. Cette installation vise à optimiser l'aspiration de l'eau tout en minimisant l'entrée de sable et de débris flottants. [73]

Le transfert des 468 406 m³ par jour d'eau de mer depuis le bassin de captage vers la station est assuré par quatre pompes, chacune ayant une capacité de pompage de 4 879 m³ par heure, avec une pompe supplémentaire prévue pour les situations de secours.

Pour préserver la qualité de l'eau dans le processus de dessalement, un détecteur d'hydrocarbures est installé au point de captage. Ce dispositif est conçu pour détecter et contrôler toute contamination par les hydrocarbures, avec un seuil de détection fixé à 0,1 µg/l. [73]

5.7.2 Prétraitement chimique

- **Désinfection** : L'eau brute est traitée avec de l'hypochlorite de sodium, généré sur place par électrolyse, pour désinfecter et éliminer les contaminants biologiques.

- **Coagulation-Floculation** : Utilisation de chlorure ferrique (FeCl_3) comme coagulant, ajusté à un pH entre 5.5 et 8.3, pour faciliter la formation et la croissance de microparticules, retenues ultérieurement par des filtres à sable.
- **Élimination du chlore résiduel** : Le métabisulfite de sodium est utilisé pour neutraliser le chlore résiduel avant que l'eau atteigne les membranes d'osmose inverse, afin de prévenir leur détérioration par oxydation.
- **Prévention de l'entartrage** : Un inhibiteur anti-scalant est ajouté pour empêcher la précipitation des sels sur les membranes et maintenir les ions dispersés. [73]

5.7.3 Prétraitement physique

- **Filtration à sable** : Cette technique emploie 36 filtres, chacun ayant une surface de 92 m^2 , une longueur de 11,9 m et une largeur de 7,9 m, avec une épaisseur de sable de 1,2 m. La vitesse de filtration est de 5,19 m/h.
- **Filtration à cartouche** : Après traitement chimique, l'eau est dirigée vers 22 filtres à cartouche, contenant chacun 290 cartouches, pour une filtration fine préalable à l'osmose inverse. [73]

5.7.4 L'Osmose inverse

L'étape d'osmose inverse est réalisée sous haute pression (55 à 85 bars) pour vaincre la pression osmotique des pertes de charges du système afin d'assurer le transfert à travers les membranes, avec un système composé de 5 pompes à haute pression, dont 4 en fonctionnement et une de secours. Douze lignes (racks) d'osmose inverse produisent chacune $17,391 \text{ m}^3/\text{jour}$, totalisant une capacité de $208,696 \text{ m}^3/\text{jour}$. Le taux de conversion est de 45 %, indiquant l'efficacité du processus en termes de conversion de l'eau de mer en eau dessalée. [73]

5.7.5 Le post-traitement

- **Reminéralisation :**

Un réservoir de 20 000 m³, divisé en deux compartiments, est utilisé pour la reminéralisation, qui se fait via l'addition de lait de chaux et de dioxyde de carbone sur deux lignes indépendantes ; Cette configuration assure une mixité et une réactivité adéquates des réactifs avec l'eau osmosée.

Le dioxyde de carbone, nécessaire à l'équilibre du pH et à la réduction des concentrations en carbonates, est produit sur site, utilisant le gaz naturel du gazoduc Sonelgaz à proximité.

L'hydroxyde calcique est stocké dans des silos et transféré dans des réservoirs de dissolution où le lait de chaux est préparé, puis pompé vers les chambres de mélange. [73]

- **Désinfection :**

Après la reminéralisation, l'eau est désinfectée par dosage d'hypochlorite de sodium. Cette étape est essentielle pour éliminer les micro-organismes restants et garantir la potabilité de l'eau avant sa libération dans le réseau de distribution. [73]

5.7.6 Gestion des déchets solides et émissions atmosphériques

Les déchets solides, y compris les emballages de produits chimiques, les membranes usagées, et les déchets commerciaux, sont gérés de manière à ne pas présenter de risques pour l'environnement.

Dans le cadre de l'unité de production de CO₂, la Mono-Éthanol-Amine (MEA) est utilisée pour capturer le CO₂ issu de la combustion de combustibles, ce dernier étant ensuite stocké dans deux réservoirs d'une capacité de 80 tonnes chacun. Le dioxyde de carbone capturé est injecté dans le perméat post-membrane pour la reminéralisation de l'eau, processus dont le suivi est rigoureusement assuré par des mesures de pH et de conductivité à la sortie du réservoir d'eau. De plus, un échantillon d'eau est prélevé et analysé chaque heure par le personnel du laboratoire de contrôle, garantissant ainsi la qualité et la conformité des standards environnementaux. [73]

5.8 La problématique

La station de dessalement est confrontée à des défis majeurs durant les périodes de crues, où les matières en suspension (MES) peuvent excéder 80 mg/L, surpassant largement la capacité nominale de traitement prévue pour des valeurs de 15 mg/L. En conséquence, la station doit cesser ses opérations durant ces périodes, ce qui interrompt la fourniture d'eau à la population et compromet l'intégrité des membranes d'osmose inverse.

L'élévation des MES entraîne une hausse significative de l'Indice de Densité de Silice (SDI), un paramètre essentiel pour évaluer le risque de colmatage des membranes d'osmose inverse. Un SDI supérieur à 5 est généralement considéré comme critique, et durant ces périodes turbides, le SDI peut osciller entre 5 et 7, augmentant considérablement le risque de colmatage des membranes. Ce phénomène accélère la nécessité de maintenance, incluant le nettoyage fréquent et le remplacement des membranes, pour maintenir l'efficacité de l'osmose inverse.

En outre, la station doit composer avec une contrainte spatiale significative, puisqu'elle dispose uniquement de 1600 m² pour l'installation de tous les équipements nécessaires. Cette limitation de surface impose des défis supplémentaires pour l'intégration et l'optimisation des processus du prétraitement afin de gérer efficacement les fluctuations de la qualité de l'eau brute et assurer une production continue.



Figure 5-3 Zone disponible pour l'exploitation à la station de dessalement de Ténès, Algérie [72]

5.9 Les variantes proposées

5.9.1 Gestion intégrée et surveillance proactive du bassin versant

Pour contrecarrer efficacement les impacts des sédiments sur une station de dessalement située dans une baie et exposée aux apports turbides d'un oued Mainis à 800 mètres, l'adoption d'une gestion proactive du bassin versant est primordiale. Cette gestion implique une collaboration étroite avec les autorités locales et régionales pour implémenter des mesures visant à minimiser l'érosion et le ruissellement. Parmi ces mesures, la reforestation, la construction de terrasses, et l'établissement de structures de contrôle de l'érosion telles que des barrages ou des digues sont particulièrement efficaces. Ces interventions permettent de stabiliser le sol, modérer le flux de

sédiments durant les périodes de crue, et ainsi améliorer la qualité de l'eau captée pour le dessalement.

Parallèlement, l'intégration de technologies de télédétection avancées joue un rôle dans le suivi en continu des conditions du bassin versant. L'emploi de drones ou de satellites équipés de capteurs pour mesurer la turbidité et les mouvements de sédiments offre la possibilité de réguler dynamiquement les opérations de la station de dessalement. Cette surveillance précise et en temps réel permet d'adapter les procédures de traitement en fonction des variations observées, optimisant ainsi la gestion des ressources et la maintenance.

Cependant, ces approches présentent des défis en termes de coordination entre diverses parties prenantes, nécessitent des investissements financiers importants, et ne produisent des bénéfices tangibles qu'à moyen ou long terme. De plus, elles sont sensibles aux conditions climatiques extrêmes qui peuvent compromettre leur efficacité. Malgré leur potentiel, la mise en œuvre de ces mesures requiert une planification rigoureuse et un engagement soutenu pour être efficaces, des facteurs qui doivent être pris en compte étant donné l'urgence des besoins en eau.

5.9.2 Optimisation de la localisation des prises d'eau

Pour améliorer la gestion de la turbidité à la station de dessalement de Tenes, située dans une baie, il est recommandé de réviser soigneusement les emplacements des prises d'eau, surtout pendant les périodes de crue.

Le captage actuel, situé à 500 mètres de la côte à une profondeur de 8 mètres, pourrait être étendu, en s'inspirant de configurations comme celle de la station de Hamma à Alger, qui se trouve à 6 km de la côte. Cette modification pourrait diminuer l'impact des sédiments des eaux de ruissellement et réduire la turbidité.

L'usage de modèles de simulation hydrodynamique est conseillé pour examiner l'exposition actuelle des prises d'eau aux flux de sédiments, permettant d'identifier des zones moins affectées par les sédiments. Cela pourrait réduire la nécessité de traitements intensifs en amont et améliorer

la qualité de l'eau brute. En adoptant ces ajustements stratégiques, la station pourrait non seulement gérer de manière plus efficace les variations saisonnières de la qualité de l'eau mais aussi maintenir une production continue d'eau dessalée, tout en préservant l'intégrité des équipements de traitement avancé.

Toutefois, l'optimisation de la localisation des prises d'eau pourrait entraîner des coûts élevés et des complexités logistiques dues à la nécessité de nouvelles infrastructures sous-marines et d'études hydrodynamiques avancées. Cette stratégie peut également être impactée par des incertitudes liées aux prévisions des modèles et aux variations climatiques, ce qui pourrait altérer son efficacité. Les approbations réglementaires et les évaluations d'impact environnemental requises ajoutent une couche supplémentaire de complexité et de délai. De plus, les événements de crue exceptionnels peuvent toujours surpasser les améliorations réalisées, limitant ainsi la réduction attendue de la turbidité.

5.9.3 Élévation et ajustement de la tour de captage

L'ajustement structurel de la tour de captage pour optimiser sa hauteur ou sa position est une stratégie envisagée pour améliorer l'efficacité de la capture de l'eau en minimisant la concentration de sédiments à l'entrée. Ce processus implique l'utilisation de modèles de simulation hydrodynamique pour analyser le comportement des sédiments et les dynamiques des courants dans le corps d'eau environnant. Ces modèles fournissent des informations cruciales pour positionner stratégiquement la tour afin d'éviter les zones à forte charge sédimentaire, ce qui peut réduire significativement la charge de matières en suspension dans l'eau brute et limiter ainsi l'usure et l'encrassement des équipements de prétraitement.

Cependant, cette approche présente plusieurs défis. Premièrement, les ajustements nécessitent des opérations d'ingénierie complexes et coûteuses, particulièrement dans un environnement aquatique, ce qui peut entraîner des coûts élevés et des interventions techniques spécialisées. Deuxièmement, les modèles de simulation hydrodynamique, bien qu'utiles, sont sujets à des incertitudes qui peuvent affecter la fiabilité des résultats obtenus et rendre la prédiction des bénéfices moins

certaine. Troisièmement, la mise en œuvre de ces ajustements structurels peut être chronophage, posant des difficultés lorsque des solutions rapides sont nécessaires pour répondre à des problèmes immédiats de qualité de l'eau. Enfin, les modifications apportées à la structure de la tour de captage peuvent avoir des impacts environnementaux significatifs sur les habitats marins locaux, nécessitant une évaluation et une gestion attentives des conséquences écologiques.

5.9.4 Utilisation de barrières à sédiments

L'utilisation de barrières à sédiments est une méthode envisagée pour contrôler l'entrée des sédiments dans les prises d'eau, particulièrement efficace dans les zones sujettes à des flux sédimentaires élevés durant les périodes de crue. Ces barrières physiques, installées près des points de captage, jouent un rôle crucial en réduisant la quantité de sédiments qui atteignent les installations de traitement. Ce mécanisme contribue à alléger la charge sur les équipements de prétraitement, préservant ainsi leur intégrité et améliorant la qualité de l'eau en amont. En filtrant les particules en suspension, ces barrières facilitent également la gestion initiale de l'eau captée et assurent une meilleure conformité aux normes de qualité requises pour le prétraitement.

Toutefois, l'utilisation de barrières à sédiments comporte plusieurs contraintes. D'une part, leur efficacité peut être limitée par des débits d'eau très élevés ou des charges sédimentaires exceptionnelles, qui sont courantes durant les périodes de crue, où la capacité de filtration peut être saturée. D'autre part, elles exigent un entretien régulier pour prévenir le colmatage, engendrant ainsi des coûts opérationnels persistants et des interventions manuelles fréquentes. De plus, l'installation de ces barrières peut impacter l'environnement local, en modifiant les habitats ou en entravant la mobilité des espèces aquatiques près des zones de captage. Enfin, leur mise en œuvre doit se conformer à des réglementations environnementales rigoureuses, pouvant causer des retards et des contraintes supplémentaires dans la planification et la réalisation des projets.

5.9.5 Amélioration du prétraitement

Pour améliorer le prétraitement dans la station de dessalement, notamment face à des niveaux de turbidité dépassant les capacités des filtres à sable existants, il est préconisé d'adopter des solutions

qui peuvent efficacement réduire cette turbidité avant qu'elle n'atteigne les étapes de filtration à sable. Pour cela, plusieurs approches peuvent être adoptées :

- **Optimisation des procédés de coagulation et de floculation** : Avant la filtration, l'ajout de coagulants (le chlorure ferrique) peut être optimisé pour agglomérer les particules colloïdales même sous forme de microflocs, qui sont plus facilement retenus par les filtres à sable. La floculation aide à augmenter la taille des particules, facilitant ainsi leur élimination lors de la filtration. Il peut être nécessaire d'ajuster les doses de coagulant pour améliorer l'efficacité de cette étape.
- **Intégration de l'ultrafiltration** : Comme mentionné précédemment, l'installation d'un système d'ultrafiltration avant les filtres à sable peut considérablement réduire la turbidité. L'ultrafiltration éliminera efficacement la majorité des particules fines et des autres contaminants, protégeant ainsi les filtres à sable et à cartouche de l'encrassement et prolongeant leur durée de vie.
- **Utilisation de décanteurs lamellaires** : Installer un décanteur lamellaire avant la filtration à sable peut également être une solution efficace. Ce type de décanteur utilise des plaques inclinées pour maximiser la surface de sédimentation, permettant ainsi une séparation plus efficace des particules en suspension par gravité. Cela réduit la charge de particules arrivant aux filtres à sable.
- **Amélioration des filtres à sable** : Considérez la mise à niveau ou la modification des filtres à sable existants pour augmenter leur capacité à gérer des turbidités plus élevées. Cela peut inclure l'augmentation de l'épaisseur de la couche de sable ou l'utilisation de médias filtrants multicouches avec des matériaux innovants (argiles expansées de différentes granulométries) pour améliorer la capture des particules.
- **Surveillance et ajustements en temps réel** : Mettre en place des systèmes de mesure et de contrôle en continu de la turbidité pour ajuster automatiquement les processus de traitement en fonction des variations de la qualité de l'eau brute. Cela permet de réagir rapidement à des augmentations de turbidité et d'ajuster les dosages de traitement ou d'activer des systèmes de prétraitement supplémentaires.

Ces solutions, appliquées individuellement ou en combinaison, améliorent grandement la capacité de la station à gérer des eaux à haute turbidité, réduisant l'usure et l'encrassement des équipements et augmentant l'efficacité générale du système de dessalement. Cette approche contribue à la performance opérationnelle, à la durabilité et à la fiabilité à long terme de la station, répondant efficacement aux défis environnementaux et aux variations saisonnières.

Cependant, ses améliorations proposées pour le prétraitement à la station de dessalement, notamment l'intégration de l'ultrafiltration, nécessitent une attention particulière en raison de plusieurs défis. D'abord, l'adoption de nouvelles technologies implique des investissements initiaux élevés, ce qui peut constituer une contrainte financière majeure. Ensuite, ces systèmes complexes exigent une maintenance régulière et une expertise technique spécialisée, souvent absente localement, entraînant des coûts opérationnels accrus et la nécessité de formation ou de recrutement de personnel qualifié. De plus, la variabilité des conditions d'entrée de l'eau nécessite des ajustements fréquents des paramètres opérationnels, augmentant la complexité de la gestion. Il est essentiel de planifier minutieusement l'implémentation de ces améliorations pour s'assurer que les bénéfices en termes de qualité de l'eau et de durabilité justifient les investissements et les défis opérationnels.

5.10 Le choix de la variante

La variante consistant à intégrer un décanteur lamellaire pour améliorer la clarification dans la station de dessalement a été sélectionnée en réponse aux concentrations élevées de matières en suspension (MES), qui peuvent monter jusqu'à 80 ppm durant les périodes de crue. Ce choix stratégique permet de réduire ces concentrations à environ 15 ppm, un seuil où les filtres à sable fonctionnent efficacement.

L'ajout du décanteur lamellaire est essentiel pour minimiser la fréquence des interventions de maintenance telles que le nettoyage et le remplacement des membranes, tout en protégeant les composants essentiels du système. Cette optimisation du prétraitement contribue à une gestion plus

efficace des sédiments et renforce la continuité opérationnelle, équipant la station pour mieux gérer les variations environnementales et assurant une performance durable du système de dessalement.

5.11 Système de Distribution

Pour la conception du système de distribution d'eau dans une installation de traitement, l'intégration d'un collecteur principal alimenté par quatre pompes opérationnelles est envisagée. Ce collecteur jouera un rôle crucial dans la gestion du débit et de la pression au sein de l'installation.

Afin d'assurer une régulation efficace de la pression et une redirection adéquate du flux vers les unités de traitement subséquentes, l'intégration d'un système de bypass équipé d'un régulateur de pression est prévue. Ce bypass sera connecté aux filtres à sable, permettant ainsi une adaptation flexible aux variations de charge et de conditions opérationnelles.

Pour améliorer la fiabilité et la disponibilité de la station, le collecteur sera subdivisé en plusieurs conduites principales desservant les décanteurs. Cette configuration permet une maintenance indépendante de chaque ligne, assurant ainsi que la station demeure opérationnelle lors des interventions sur une des lignes.

5.12 Dimensionnement du décanteur

05 décanteurs distincts seront implantés pour les raisons suivantes :

- **Flexibilité Opérationnelle** : Chaque décanteur peut être opéré, entretenu ou arrêté indépendamment sans compromettre la capacité de traitement globale de l'installation. Cette modularité permet d'effectuer des maintenances ciblées sans interrompre l'ensemble des opérations, optimisant ainsi la gestion de l'installation.
- **Redondance** : La présence de plusieurs décanteurs assure une continuité du traitement, même en cas de défaillance d'une unité. Cette redondance garantit une fiabilité accrue du système, essentielle pour maintenir une production continue.

- **Adaptabilité** : La conception permet une extension facile par l'ajout de nouvelles unités sans nécessiter une reconfiguration des unités existantes, offrant ainsi une grande flexibilité pour répondre aux besoins futurs d'augmentation de capacité.
- **Optimisation de l'espace** : Le nombre de décanteurs a été réduit au minimum nécessaire pour répondre efficacement à la capacité de traitement requise, tout en tenant compte de la limitation de l'espace disponible. Cette approche permet de maximiser l'utilisation de l'espace, crucial dans les environnements où la superficie est restreinte, assurant ainsi que l'ensemble du système est conçu pour une efficacité spatiale et opérationnelle maximale.

Etape 1 : Débit par décanteur

$$Q = \frac{Q_t}{5}$$

$$Q = \frac{468\,406}{5}$$

$$Q = 93\,681,2 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$Q = 1,084 \text{ m}^3/\text{s}$$

Etape 2 : Choix de la vitesse ascensionnelle

Pour les décanteurs traitant de l'eau de mer avec une densité de 1,03 kg/L et une viscosité de 0,8283cP, une vitesse ascensionnelle conservatrice est recommandée pour minimiser le risque de resuspension des particules coagulées.

Selon Degremont, une vitesse typique pour les eaux de mer en décantation primaire est d'environ 0.5 mm/s, prenant en compte la densité et la viscosité accrues.

Étape 3 : Choix du temps de séjours

Pour les installations de dessalement spécifiquement, Degremont peut recommander un temps de séjour autour de 45 minutes à 1 heure dans les décanteurs lamellaires, qui sont fréquemment utilisés pour maximiser l'efficacité de l'espace et améliorer la qualité de l'eau traitée avant le passage à des étapes de traitement supplémentaires comme l'osmose inverse.

Étape 4 : Calcul de la surface théorique sans lamelles

$$S = \frac{Q}{v}$$
$$S = \frac{1,084}{5 \times 10^{-4}}$$
$$S = 2168 \text{ m}^2$$

Étape 5 : Utilisation des lamelles pour augmenter la surface efficace

- **Angle des lamelles** : Pour améliorer l'efficacité de la décantation, les lamelles sont inclinées, généralement à 60°. L'efficacité des lamelles permet de réduire l'empreinte au sol du décanteur.
- **Surface effective des lamelles** : Avec un angle de 60 degrés, la surface effective est approximativement doublée par rapport à la surface au sol occupée, ce qui améliore significativement l'efficacité du processus de décantation.

$$S_{eff} = S \times \frac{1}{\cos 60}$$

$$S_{eff} = 2168 \times \frac{1}{0,5}$$

$$S_{eff} = 4336 \text{ m}^2$$

Étape 6 : Calcul du volume et dimensionnement physique avec lamelles

En utilisant la profondeur de 5,5 m et la surface théorique augmentée :

- **Volume du décanteur**

$$V = Q \times t$$

$$V = 1,084 \times 2700$$

$$V = 2926,8 \text{ m}^3$$

- **Surface au sol avec lamelles**

$$\text{Surface au sol} = \frac{\text{Volume}}{\text{Hauteur}}$$

$$S_{\text{au sol}} = \frac{2926,8}{5,5}$$

$$S_{\text{au sol}} = 532,1 \text{ m}^2$$

Pour un rapport $\frac{\text{Longueur}}{\text{Largeur}}$ de 2 :

- **Largeur du décanteur**

$$W = \sqrt{\frac{532,1}{2}}$$

$$W = 16,3 \text{ m}$$

- **Longueur du décanteur :**

$$L = 16,3 \times 2$$

$$L = 32,6 \text{ m}$$

Etape 7 : Nombre de lamelles et espacement

- **Espacement entre les lamelles :** Pour les décanteurs lamellaires traitant l'eau de mer, Degremont suggère un espacement qui peut généralement varier, mais un espacement typique de 5 cm est souvent recommandé
- **Nombre de lamelles**

$$\text{Nombre de lamelle} = \frac{16,3}{0,05 + 0,005}$$

$$\text{Nombre de lamelle} = 296$$

Chaque lamelle augmente la surface effective, permettant ainsi d'utiliser plus efficacement l'espace vertical pour la décantation et de réduire l'empreinte au sol nécessaire.

Etape 07 : Calcul du débit de boues

- **Débit traité par un seul décanteur :** 93681,2 m³/jour
- **Concentration initiale de MES :** 80 ppm (mg/L)
- **Concentration finale de MES :** 15 ppm (mg/L)
- **Réduction de MES :** 80 ppm - 15 ppm = 65 ppm

$$\text{Débit de boues} = \text{Débit d'eau} \times (MES_{\text{initiaux}} - MES_{\text{finaux}}) \times \text{densité de l'eau de mer}$$

$$\text{Débit de boues} = 93681,2 \times (80 - 15) \times 10^{-3} \times 1,03$$

$$\text{Débit de boues} = 6272 \text{ kg/jour}$$

Étape 08 : Calcul pour les 5 décanteurs

- **Surface occupée**

- $S_{totale} = 532,1 \times 5$

$$S_{totale} = 2660,5 \text{ m}^2$$

- **Débit de boues**

$$\text{Débit de boues}_{total} = 6272 \times 5$$

$$\text{Débit de boues}_{total} = 31360 \text{ kg/jour}$$

$$\text{Débit de boues}_{total} = 31,360 \text{ tonnes/jour}$$

Étape 09 : Calcul du débit du coagulant

La dose de coagulant appliquée dans les stations de dessalement varie selon les normes, allant de 2 ppm à 10 ppm pour un produit pur. [74]

- **Pour une dose de 2 ppm**

$$\text{quantité du coagulant} = \text{dose du coagulant} \times \text{Débit de captage}$$

$$\text{quantité du coagulant} = 2 \times 10^{-6} \times 468604 \times \frac{10^3}{24}$$

$$\text{quantité du coagulant} = 39,05 \text{ kg/h}$$

$$\text{chemical product concentration} = \text{dilution} \times \text{concentration du produit}$$

$$\text{chemical product concentration} = 20\% \times 40\%$$

$$\text{chemical product concentration} = 0,08$$

$$\text{Débit du coagulant} = \frac{39,05}{0,08}$$

$$\text{Débit du coagulant} = 488,13 \text{ l/h}$$

- **Pour une dose de 10 ppm**

$$\text{quantité du coagulant} = \text{dose du coagulant} \times \text{Débit de captage}$$

$$\text{quantité du coagulant} = 10 \times 10^{-6} \times 468604 \times \frac{10^3}{24}$$

$$\text{quantité du coagulant} = 195,25 \text{ kg/h}$$

$$\text{chemical product concentration} = \text{dilution} \times \text{concentration du produit}$$

$$\text{chemical product concentration} = 20\% \times 40\%$$

$$\text{chemical product concentration} = 0,08$$

$$\text{Débit du coagulant} = \frac{390,5}{0,08}$$

$$\text{Débit du coagulant} = 2440,65 \text{ l/h}$$

Etape 10 : Calcul du débit du floculant

La dose de coagulant appliquée dans les stations de dessalement varie selon les normes, allant de 0,5 ppm à 1,5 ppm pour un produit pur. [74]

- **Pour une dose de 0,5 ppm**

$$\text{quantité du coagulant} = \text{dose du coagulant} \times \text{Débit de captage}$$

$$\text{quantité du coagulant} = 0,5 \times 10^{-6} \times 468604 \times \frac{10^3}{24}$$

$$\text{quantité du coagulant} = 9,76 \text{ kg/h}$$

$$\text{chemical product concentration} = \text{dilution} \times \text{concentration du produit}$$

$$\text{chemical product concentration} = 0,5\% \times 100\%$$

$$\text{chemical product concentration} = 5 \times 10^{-3}$$

$$\text{Débit du coagulant} = \frac{9,76}{5 \times 10^{-3}}$$

$$\text{Débit du coagulant} = 1952 \text{ l/h}$$

- **Pour une dose de 1,5 ppm**

$$\text{quantité du coagulant} = \text{dose du coagulant} \times \text{Débit de captage}$$

$$\text{quantité du coagulant} = 1,5 \times 10^{-6} \times 468604 \times \frac{10^3}{24}$$

$$\text{quantité du coagulant} = 29,29 \text{ kg/h}$$

$$\text{chemical product concentration} = \text{dilution} \times \text{concentration du produit}$$

$$\text{chemical product concentration} = 0,5\% \times 100\%$$

$$\text{chemical product concentration} = 5 \times 10^{-3}$$

$$\text{Débit du coagulant} = \frac{29,29}{5 \times 10^{-3}}$$

$$\text{Débit du coagulant} = 5858 \text{ l/h}$$

5.13 Discussion des résultats

Dans le contexte de la planification de la station de traitement d'eau à Tenes, où l'espace disponible pour l'installation des décanteurs est limité à environ 1600 m², une réévaluation des options de technologie de décantation est impérative.

La surface requise pour les décanteurs initialement dimensionnés est de 2660 m², ce qui excède la superficie disponible de 1060 m². Cela représente un dépassement de près de 66% par rapport à l'espace initialement prévu, posant un défi significatif pour le respect des contraintes spatiales tout en atteignant les objectifs de traitement.

5.14 Proposition de solution alternative

L'analyse de l'espace disponible met en lumière une restriction majeure dans l'implantation des systèmes de décantation traditionnels, qui nécessitent une grande empreinte au sol pour fonctionner efficacement. Afin de surmonter cette limitation, il est proposé d'adopter une technologie plus compacte et efficace, telle que le système Actiflo développé par Veolia. [75]



Figure 5-4 Unité Actiflo de Veolia : décanteur lamellaire pour le traitement de l'eau [75]

5.14.1 Technologie Actiflo

Actiflo est une solution de décantation haute performance qui utilise la technologie de micro-sable pour accélérer le processus de sédimentation des particules. Cette technologie est particulièrement adaptée aux contextes où l'espace au sol est un facteur limitant. Voici les avantages clés de l'implémentation d'Actiflo :

- **Efficacité Spatiale** : Grâce à son design compact, Actiflo requiert significativement moins d'espace que les décanteurs traditionnels ; entre 2 m² et 55 m² par unité avec une capacité unitaire de 2 à 2500 m³/jour, ce qui permet de gérer des volumes importants de traitement dans une empreinte réduite.
- **Rapidité de Traitement** : Actiflo est conçu pour offrir des temps de rétention très courts, ce qui est idéal pour des installations nécessitant une capacité de réponse rapide aux variations de charge.
- **Flexibilité et Scalabilité** : Cette technologie permet une grande flexibilité opérationnelle et peut être facilement adaptée pour répondre à des augmentations futures de la demande ou à des changements dans les réglementations environnementales.
- **Performance de Traitement** : Actiflo est reconnu pour sa capacité à traiter efficacement les eaux avec des charges élevées de matières en suspension, ce qui est crucial pour atteindre les normes de qualité d'eau exigées. [75]

5.14.2 Les caractéristiques du fonctionnement de l'Actiflo

L'ActifFlow est un procédé de clarification très compact et ultra rapide utilisant du microsable qui sert à initier et faciliter la formation de floc. Le microsable agit aussi comme un lest accélérant la décantation des floes, ce qui permet de concevoir des clarificateurs au temps de floculation très court et aux vitesses de décantation très élevées, ainsi l'emprise au sol est 5 à 30 fois plus faible que celle d'autres clarificateurs de capacité comparable. [76]

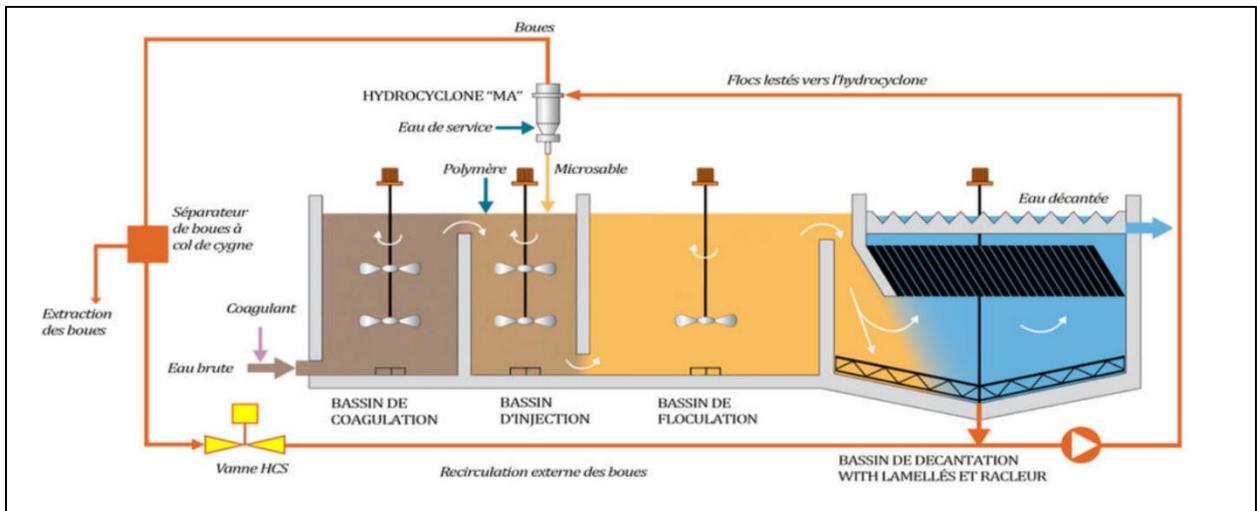


Figure 5-5 Schéma de l'unité Actiflo de Veolia : processus de coagulation, floculation et décantation lamellaire [77]

L'Actiflot se compose de trois bassins de floculation avec agitateur, suivi d'un décanteur lamellaire. Ce dernier comprend un racleur de fond ainsi que des lamelles et des goulottes de reprise. Des pompes centrifuges revêtues de caoutchouc servent à refouler les boues et le microsable vers des hydrocyclones pour le nettoyage et la récupération du microsable.

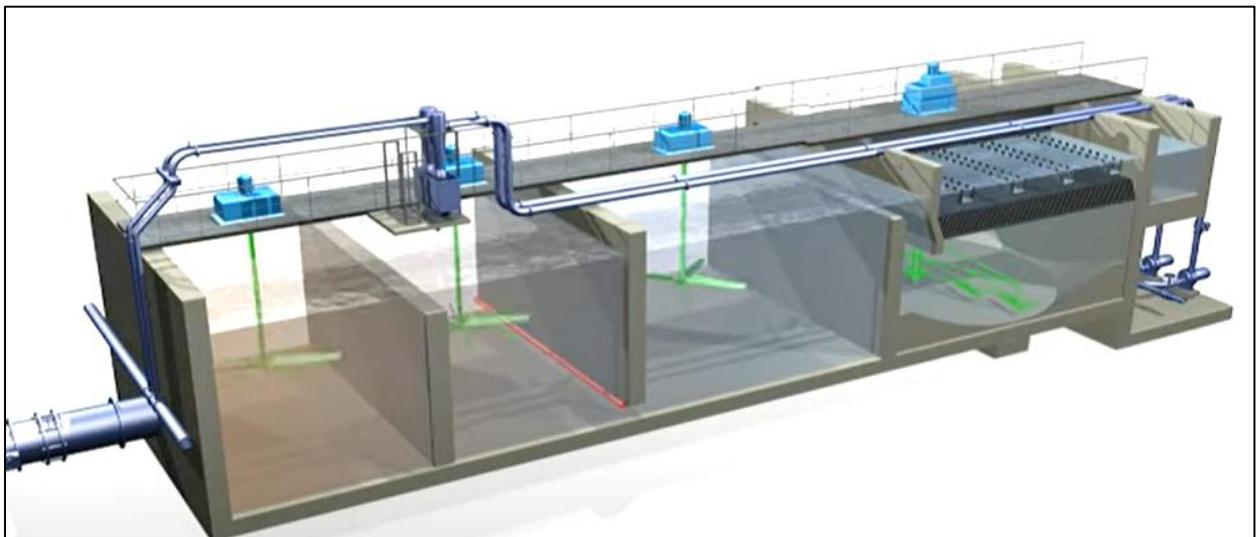


Figure 5-6 Illustration 3D d'un système de traitement Actiflo avec décantation lamellaire [76]

Après l'ajout du coagulant, l'eau brute est introduite dans le bassin de coagulation pour mélanger vigoureusement l'eau avec le produit chimique et former des floes.

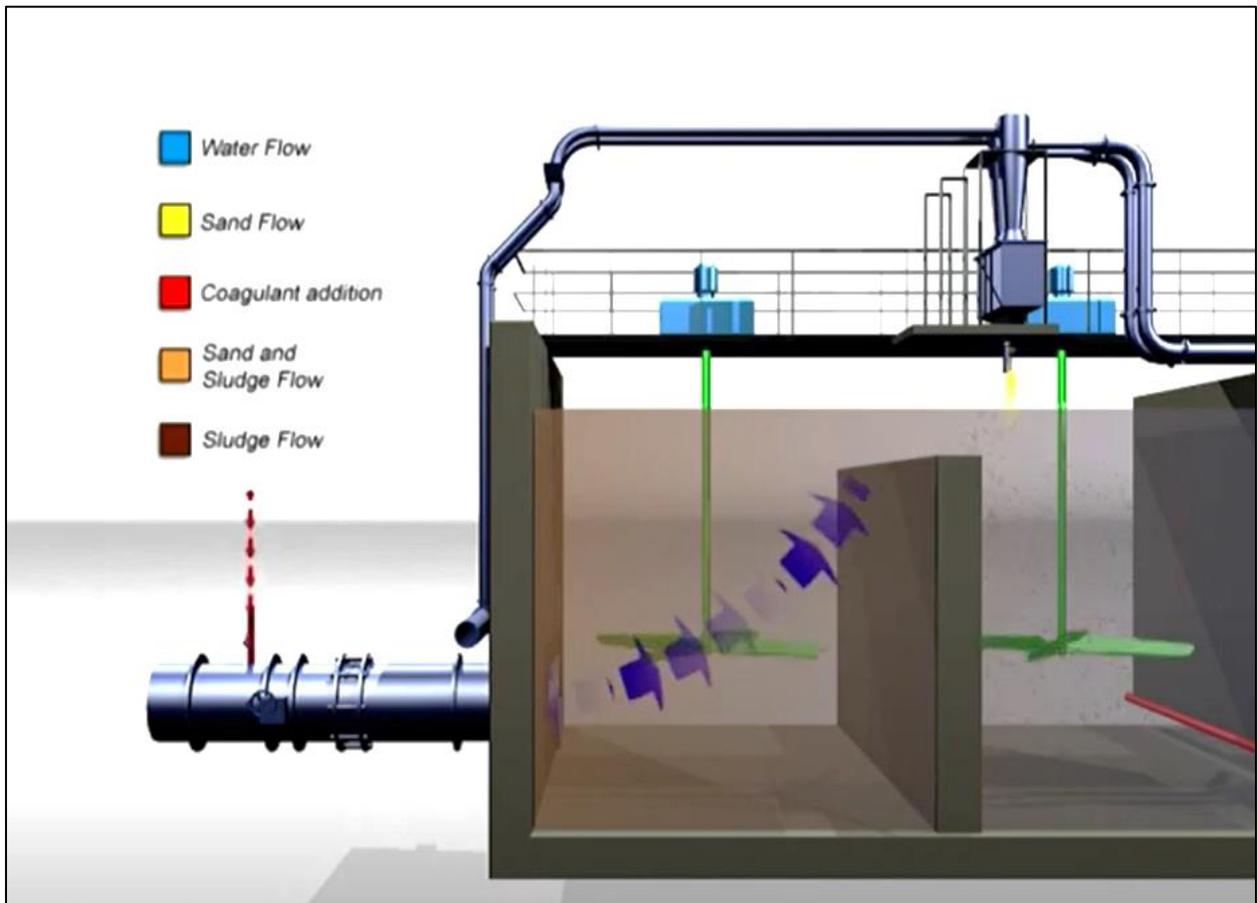


Figure 5-7 Illustration du bassin de coagulation de l'unité Actiflo après l'addition de coagulant [76]

L'eau floquée est ensuite introduite dans le bassin d'injection dans lequel du polymère et du micro-sable sont ajoutés à l'eau dans des conditions de mélange intensif afin de rattacher les floes au micro-sable à l'aide du polymère.

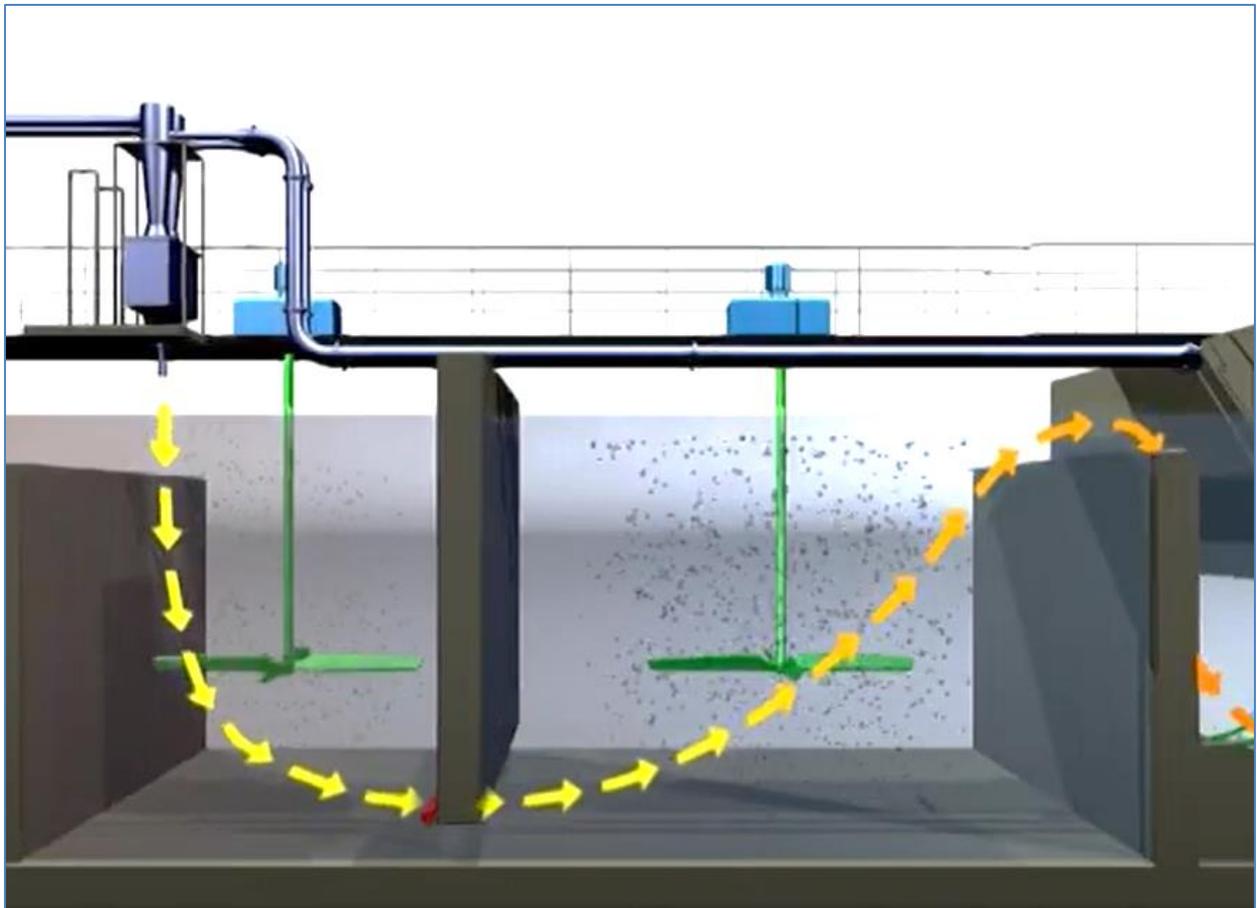


Figure 5-8 Illustration de l'injection de polymère et de microsable dans le bassin de floculation de l'unité Actiflo [76]

Dans le bassin de maturation, une quantité supplémentaire de polymère est ajoutée à l'eau, un mélange moins vigoureux est appliqué afin de créer des conditions idéales pour la formation de floc lestés plus robustes et plus denses caractérisés par des vitesses de décantation très élevées.

L'eau floculée est alors introduite dans le décanteur, les flocs lestés décantent rapidement alors que l'eau clarifiée remonte à travers les lamelles et quitte le décanteur à travers une série de goulottes de surface.

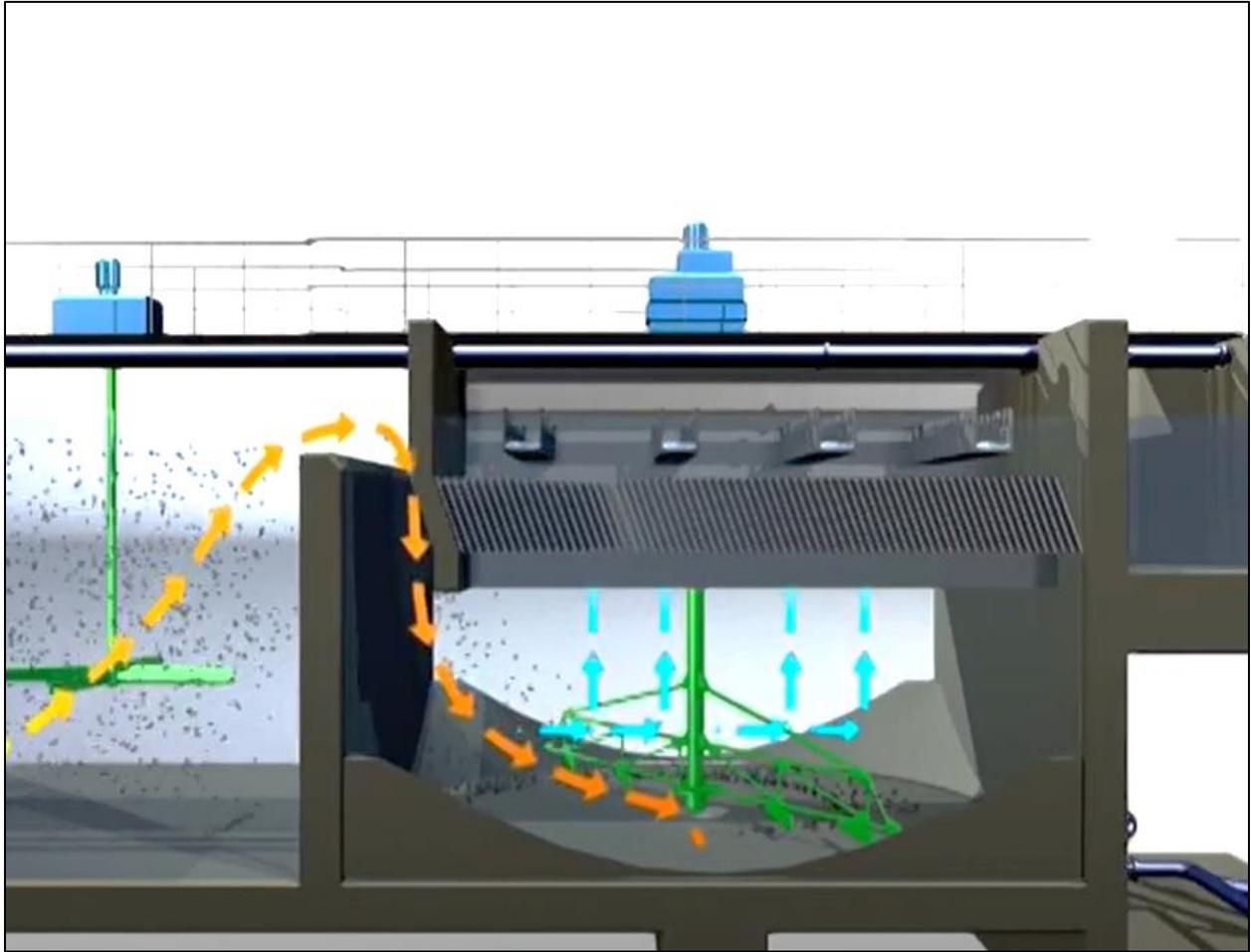


Figure 5-9 Processus de décantation dans l'unité Actiflo : séparation des floes lestés [76]

Le mélange de boues et de microsable décanté est collecté grâce à un racleur de fond, il est refoulé vers des hydrocyclones pour séparation à l'aide de pompe centrifuge revêtue de caoutchouc.

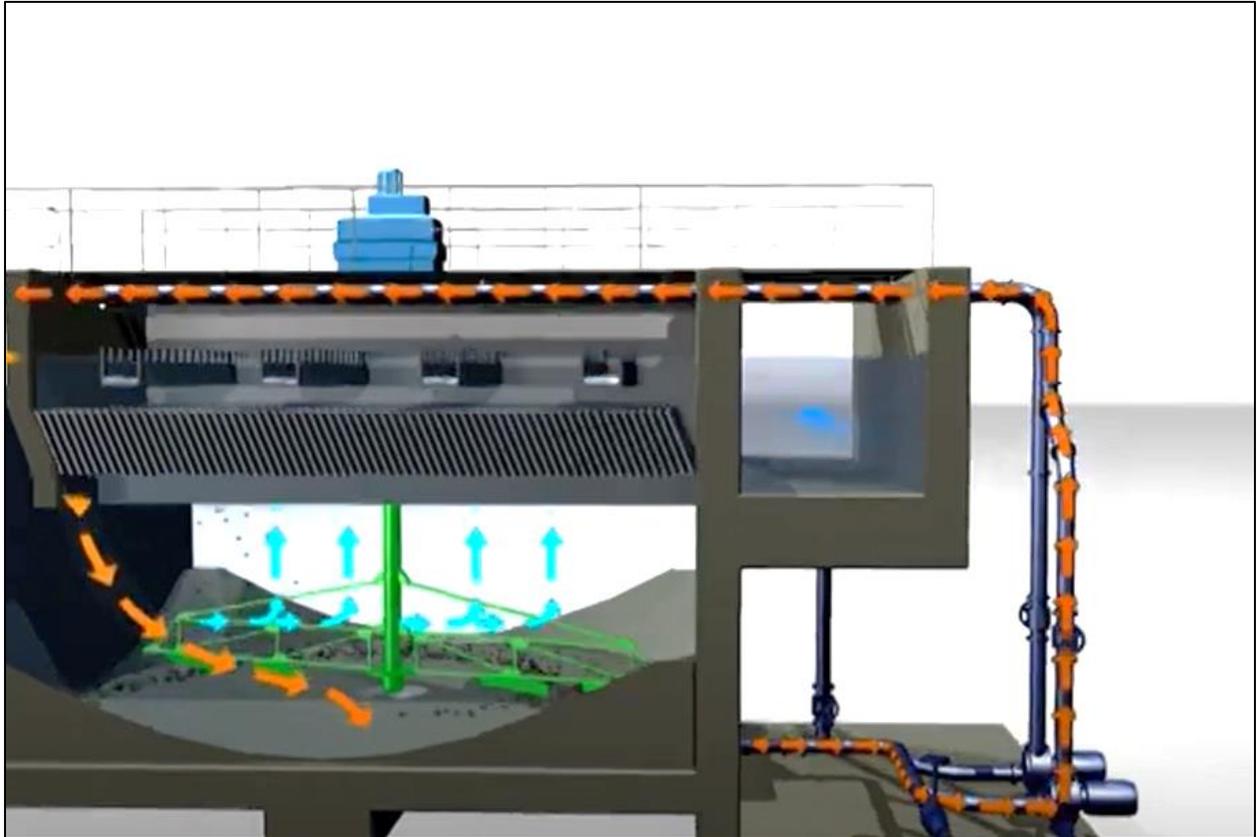


Figure 5-10 Évacuation de l'eau clarifiée et séparation des boues et du microsable dans l'unité Actiflo [76]

Dans les hydrocyclones, l'énergie de pompage est convertie en force centrifuge donnant lieu à la séparation des boues de faible densité du microsable à grande densité. Le microsable nettoyé des boues est récupéré à la souverse des hydrocyclones et réintroduit dans le bassin d'injection pour réutilisation alors que les boues quittent les hydrocyclones à la surverse.

En plus du lestage des floes, le microsable tamponne les effets des variations subites de la qualité de l'eau brute ou de son débit, rendant ainsi le procédé extrêmement stable. Les temps de séjour très court facilitent l'ajustement du procédé en quelques minutes et par conséquent l'optimisation rapide du traitement. Ces facteurs font de l'Actiflot un procédé convivial, qui est facile à opérer, très efficace pour le traitement d'eau difficile.

Les vitesses de fonctionnement de l'Actiflot entre 60 et 150 m par heure avec des temps de séjour très courts, ces vitesses élevées permettent de concevoir des installations extrêmement compactes, économiques, performantes et fiables. Ces caractéristiques uniques confèrent à l'Actif Flow le statut du procédé de clarification le plus avancé et le plus efficace du marché. [76]

5.14.3 Implantation de l'Actiflo dans la station de dessalement de Tenes

Nombre d'unités nécessaires

- Débit traité par une unité de l'actiflo : 2500 m³/h
- Débit de captage de la station : 19525,17 m³/h

$$\text{Nombre d'unités} = \frac{19525,17}{2500}$$

$$\text{Nombre d'unités} \approx 7,81$$

$$\text{Nombre d'unités} = 8$$

Surface occupée

- Surface occupée par une unité de l'Actiflo : 55 m²
- Nombre d'unités envisagées : 8 unités

$$\text{Surface totale} = 55 \times 8$$

$$\text{Surface totale} = 440 \text{ m}^2$$

5.15 Discussion des résultats

L'intégration de la technologie Actiflo dans la station de dessalement de Tenes représente une solution optimale pour répondre aux exigences de traitement tout en respectant les contraintes d'espace disponibles.

Le choix de cette technologie permet de traiter efficacement un débit de 19525,17 m³/h en utilisant 8 unités Actiflo, chacune capable de gérer 2500 m³/h.

Le calcul montre que la surface totale requise pour ces unités est de 440 m², moins de 28% de l'espace disponible, laissant suffisamment de marge pour d'autres équipements, zones de maintenance ou futures expansions. Cette efficacité spatiale est cruciale pour optimiser l'aménagement de la station tout en garantissant des opérations fluides et accessibles.

Cette approche permet non seulement de subvenir aux besoins immédiats de traitement mais aussi de poser les bases d'une gestion durable de l'eau dans la région, conformément aux standards internationaux et aux meilleures pratiques industrielles. Pour une mise en œuvre réussie, une collaboration étroite avec Veolia pour l'adaptation de la technologie aux spécificités locales sera essentielle.

CONCLUSION

Le prétraitement des eaux dans une station de dessalement est une étape cruciale pour assurer la longévité et l'efficacité des installations. Le choix des technologies de prétraitement joue un rôle déterminant dans la réduction de l'usure des équipements et dans l'amélioration de la qualité de l'eau traitée.

L'analyse de la station de dessalement de Ténès a révélé que l'espace disponible pour l'installation des décanteurs est limité, rendant les décanteurs lamellaires inadéquats en raison de leur grande empreinte au sol. En conséquence, la solution proposée et adoptée est le système Actiflo développé par Veolia.

Utilisant la technologie de micro-sable pour accélérer le processus de sédimentation, Actiflo offre une solution compacte et très performante. Cette technologie est particulièrement adaptée aux contextes où l'espace au sol est un facteur limitant, nécessitant significativement moins d'espace que les décanteurs traditionnels, avec une surface occupée par unité variant de 2 m² à 55 m² pour des capacités allant jusqu'à 2500 m³/jour.

Le choix de cette technologie permet de traiter efficacement un débit de 19525,17 m³/h en utilisant 8 unités Actiflo, chacune capable de gérer 2500 m³/h. Le calcul montre que la surface totale requise pour ces unités est de 440 m², moins de 28% de l'espace disponible, laissant suffisamment de marge pour d'autres équipements, zones de maintenance ou futures expansions.

De plus, le temps d'installation de ce système est très court, faisant de l'Actiflo une solution efficace en cas d'urgence. Cette efficacité spatiale et temporelle est cruciale pour optimiser l'aménagement de la station tout en garantissant des opérations fluides et accessibles.

L'intégration de cette technologie permet de traiter efficacement les variations de qualité de l'eau brute et les fluctuations de débit, tout en réduisant les coûts de maintenance et en améliorant l'efficacité globale du système.

Le choix de l'Actiflo répond ainsi aux exigences de qualité de l'eau et de durabilité, tout en optimisant l'utilisation de l'espace disponible dans la station de dessalement de Ténès.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Duan, J., & Gregory, J. (2003). Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102, 475-502.
2. Matilainen, A., Vepsäläinen, M., & Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 159(2), 189-197.
3. Functionalized Nanocelluloses in Wastewater Treatment Applications - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Mechanisms-of-coagulation-and-flocculation_fig2_275634703
4. Bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*, 41(11), 2301-2324.
5. Yan, M., Wang, D., Ni, J., Qu, J., Chow, C. W. K., & Liu, H. (2008). Floc properties and membrane fouling: Effects of flocculation time and polymers on kaolin flocs characteristics. *Water Research*, 42(14), 3831-3840.
6. CCDMD. (2018). Coagulation et floculation. Récupérée de <https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=116351&demande=desc>.
7. Tambo, N., & Watanabe, Y. (1979). Physical characteristics of flocs—II. Strength of floc. *Water Research*, 13(5), 421-427.
8. Edzwald, J. K. (2011). *Water quality & treatment: A handbook on drinking water*. American Water Works Association.
9. CCDMD. (2018). Coagulation, floculation et sédimentation. Figure 8-2c. Récupérée de <https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=116352&demande=desc>.
10. Yuan, H., Wang, H., & Zhang, L. (2017). The role of electrostatic interactions in the coagulation process of saline water. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 12-21.
11. Jiang, J., Graham, N. J. D., & André, S. (2014). Thermodynamic and kinetic factors influencing the nucleation of particles in saline water coagulation. *Chemical Engineering Journal*, 244, 195-204.

12. Liu, W., He, F., & Zhang, Y. (2018). Influence of coagulant type and water salinity on the nucleation and growth of flocs. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 537, 324-332.
13. Chun, C. H., Kim, J. S., & Lee, Y. J. (2002). Effects of polymer flocculants on the formation and growth of flocs. *Water Research*, 36(9), 2454-2462.
14. Lee, J. H., Choi, J. H., & Park, S. K. (2015). Physico-chemical interactions and growth dynamics of flocs during water treatment. *Environmental Science & Technology*, 49(8), 4775-4783.
15. Yan, M., Wang, D., & Ni, J. (2017). Physico-chemical interactions governing coagulation processes in saline water. *Journal of Water Process Engineering*, 16, 113-122.
16. Smith, J., Brown, A., & Jones, C. (2009). Influence of particle density and floc size on gravitational sedimentation in marine waters. *Journal of Marine Research*, 67(3), 123-145.
17. Johnson, M. C., & Garcia, A. (2017). The impact of salinity and mineral content on floc stability and clarification processes in seawater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 20, 35-42.
18. Kim, T.-H., Kang, J. H., & Kim, S. H. (2017). Impact of salinity change on water quality variables from the sediment of an artificial lake under anaerobic conditions. *Sustainability*, 9(8), 1429.
19. Smith, R., Johnson, M., & Green, P. (2015). Effect of salinity on floc properties and settling in marine environments. *Marine Chemistry*, 171, 10-20.
20. Moreno, R. (2020). Percolation and filtration phenomena in saline water treatment using flocculated particles. *Water Research*, 178, 115764.
21. Kim, H. S., Oh, J. H., & Lee, S. H. (2018). The role of salinity in the formation and stability of flocs in seawater treatment. *Desalination*, 443, 185-193.
22. Ahmad, T., Ahmad, K., & Ahad, A. (2022). Application of natural coagulants in water treatment: A sustainable approach. *Water*, 14(22), 3751
23. Chesters, S. P., Darton, E. G., Gallego, S., & Vigo, F. D. (2009). The safe use of cationic flocculants with reverse osmosis membranes. *Desalination and Water Treatment*, 6, 144-151.

24. Shi, W., & Lu, L. (2019). An alternative strategy for enhanced algae removal by cationic chitosan-based flocculants. *Desalination and Water Treatment*, 167, 13-21.
25. Naceradska, J., Pivokonska, L., & Pivokonsky, M. (2019). On the importance of pH value in coagulation. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*.
26. Suez. Diagram of iron solubility and pH [Figure]. Retrieved from <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/traitement-des-eaux-potables/traitements-specifiques/elimination-du-fer>
27. Mujawamariya, M. (2012). *Optimisation de la décantation primaire par ajout de produits chimiques – Jar-Tests* [Master's thesis, Institut Supérieur Industriel de Bruxelles & Université Laval]. Institut Supérieur Industriel de Bruxelles.
28. Voutchkov, N. (2013). *Desalination engineering: Planning and design*. McGraw-Hill Education.
29. Megersa, M., Gach, W., Beyene, A., Ambelu, A., & Triest, L. (2019). Effect of salt solutions on coagulation performance of *Moringa stenopetala* and *Maerua subcordata* for turbid water treatment. *Separation and Purification Technology*, 221, 319–324.
30. Cui, Y., Zhang, L., & Wang, X. (2020). The impact of temperature on coagulation processes in seawater treatment. *Water Research*, 170, 115306.
31. Springer. (2023). Temperature effects on flocculation kinetics in seawater desalination. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102329.
32. Alshahri, A. H., Giagnorio, M., Dehwah, A. H. A., Obaid, M., Missimer, T. M., Leiknes, T. O., Ghaffour, N., & Fortunato, L. (2022). Advanced coagulation with liquid ferrate as SWRO desalination pretreatment during severe algal bloom: Process performance, environmental impact, and cost analysis. *Desalination*, 537, 115864.
33. Yadai, T., & Suzuki, Y. (2023). Development of softening and ballasted flocculation as a pretreatment process for seawater desalination through a reverse osmosis membrane. *npj Clean Water*, 7, Article 7.
34. Lin, J. C.-T., Wu, C.-Y., Chu, Y.-L., & Huang, W.-J. (2018). Effects of high turbidity seawater on removal of boron and transparent exopolymer particles by chemical oxo-precipitation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*.

35. Loganathan, K., Saththasivam, J., & Sarp, S. (2018). Removal of microalgae from seawater using chitosan-alum/ferric chloride dual coagulations. *Desalination*, 433, 25–32.
36. Nguyen, T. H., Nguyen, L. P. D., Nguyen, T. T. P., Le, M. X. A., Kieu, L. T. T., To, H. T., & Bui, T. T. (2023). Optimization conditions to obtain cationic polyacrylamide emulsion copolymers with desired cationic degree for different wastewater treatments. *Polymers*, 15(12), 2693.
37. Wei, Z., Long, W., Li, S., Zhao, Y., Yu, S., & Zhou, F. (2024). Preparation of cationic polyacrylamide suspension and its application in oilfield wastewater treatment. *Polymers*, 16(1), 151.
38. Park, D., Yeo, I. H., Lee, J., Kim, H., Choi, S., & Kang, S. (2024). Combined impacts of aluminum and silica ions on RO membrane fouling in full-scale ultrapure water production facilities. *Desalination*, 577, 117380.
39. Packiam, Saranya & Ramesh, S. & Gandhimathi, R. (2021). Coagulation performance evaluation of alginate as a natural coagulant for the treatment of turbid water. *Water Practice and Technology*. 17. 10.2166/wpt.2021.123.
40. Asadi-Ghalhari, M., Usefi, S., & Mahmoodi, M. (2024). Starch-based materials as a natural compound's application in water and wastewater treatment: A systematic review. *Starch/Stärke*.
41. AdebioTech. (2011). Livre Turquoise. Retrieved from https://adebiotech.org/home/img/algues/LIVRE_TURQUOISE-V.screen.pdf
42. Université de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques. (2021). L'efficacité des plaques inclinées dans les décanteurs lamellaires pour la séparation rapide des particules en suspension. *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 45(3), 123-135.
43. Pouhaut, B., & Rapinel, F. (2010). Opérations unitaires pour la potabilisation de l'eau. [PDF]. IUT Villeurbanne – Département Chimie, XXVIIèmes Olympiades de la Chimie.
44. Silupo, Jorge & Franco, Jorge & Gutiérrez, Ramon. (2020). “Caracterización y Reducción de la materia disuelta y coloidal en la fabricación de papel y cartón reciclado en la empresa Inpetfa sac.”. *PURIQ*. 2. 10.37073/puriq.2.2.74.

45. Centrifugal decanters: Essential for rapid and efficient particle separation in high-solids water treatment. *Journal of Desalination and Water Treatment*, 123, 345-352.
46. Flottweg .(2024). Fonctionnement du décanteur. Flottweg SE. Retrieved from <https://www.flottweg.com/fr/les-produits/decanteur/fonctionnement-du-decanteur/>
47. Dehwah, A.H.A. & Li, S. & AlMashharawi, Samir & Mallon, Francis & Batang, Zenon & Missimer, Thomas. (2015). Effects of Intake Depth on Raw Seawater Quality in the Red Sea, Chapter 6. Intakes
48. Dehwah, Abdullah & Missimer, Thomas. (2016). Surface intake systems: Green choice for improving feed water quality at SWRO desalination plants, Jeddah, Saudi Arabia. *Water Research*. 88. 216-224. 10.1016/j.waters.2015.10.011.
49. Sameeullah, University & Mustafa, Atif & Lawrence, Jassica & Rajput, Asad. (2023). Design Of Lamella Separator For Enhanced Pollution Removal From NED.
50. American Chemical Society. (2022). Advanced polymers and composites for lamella clarifiers: Enhancing corrosion resistance and reducing biofouling in seawater treatment systems. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(12), 4567-4578.
51. Xu, Bing & Zhao, Xiaoguang & Zuo, Xiaochao & Yang, Huaming. (2024). Progress of phase change materials in solar water desalination system: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 271. 112874. 10.1016/j.solmat.2024.112874.
52. Reyes, C., Apaz, F., Niño, Y., Barraza, B., Arratia, C., & Ihle, C. F. (2022). A review on steeply inclined settlers for water clarification. *Minerals Engineering*, 184, 107639.
53. Gouvernement du Québec. (2012). Guide de conception des installations de production d'eau potable. Québec: Gouvernement du Québec.
54. ProMinent. (2020). Catalogue de produits 2020 - Traitement et désinfection de l'eau (Volume3).
55. Mining Technology. (2023). Escava lamella clarifiers with automated cleaning. *Mining Technology*, 34(4), 567-579
56. TubJet® System. (2023). High-pressure water jet cleaning for lamella clarifiers. *Desalination and Water Treatment*, 281, 275-287.

57. Fernández, J., Martínez, M., & García, A. (2019). Improvement of reverse osmosis membrane life span through micro-ultrafiltration pre-treatment at the Alicante desalination plant. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 154-162.
58. Smith, R., Johnson, P., & Lee, T. (2020). Cost reduction and water quality improvement using micro-ultrafiltration as pre-treatment in the Perth desalination plant. *Desalination*, 485, 114403.
59. Aydiner, C., Imer, D. Y. K., Oncel, S., Dogan, E. C., Narci, A. O., Cakmak, S., ... Tilki, Y. M. (2017). Marmara Seawater Desalination by Membrane Distillation: Direct Consumption Assessment of Produced Drinking Water.
60. Abdelrazeq, H., Khraisheh, M., & Hassan, M. K. (2022). Long-term treatment of highly saline brine in a direct contact membrane distillation (DCMD) pilot unit using polyethylene membranes. *Membranes*, 12(4), 424.
61. Landers, J. (2022, December 21). Pilot project to test forward-osmosis membranes for water reuse. ASCE.
62. Webley, J., Greene, M., & Yong, J. S. (2024). Delivery of a solar-powered forward osmosis seawater desalination plant: Trevi's 500 m³/day zero-carbon FO seawater desalination plant at NELHA. OSTI.GOV.
63. Modern Water. Forward osmosis desalination. Modern Water.
64. Sharif, A. (2012). Innovative water and renewable power generation processes. Qatar Foundation Annual Research Forum Proceedings.
65. Aquatech. (2011, June 10). Aquatech awarded SWRO plant in Ras Al Khaimah. *Water Desalination + Reuse*.
66. Blandin, G., Verliefde, A. R. D., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., & Le-Clech, P. (2016). Efficiently combining water reuse and desalination through forward osmosis—reverse osmosis (FO-RO) hybrids: A critical review. *Membranes*, 6(3), 37.
67. Samco Technologies. Microfiltration vs. ultrafiltration processes: What is the difference?
68. Toth, A. J. (2020). Modelling and optimisation of multi-stage flash distillation and reverse osmosis for desalination of saline process wastewater sources. *Membranes*, 10(10), 265.

69. Comparison between the reverse osmosis and multi-stage flash distillation methods. Retrieved from <https://www.brighthubengineering.com/power-plants/29621-comparison-between-the-reverse-osmosis-and-multi-stage-flash-distillation-methods/>
70. Amitouche, M., & Baloul, H. (2022). Empreinte de Carbone des Stations de Dessalement en Algérie. Présenté au 1er Workshop sur l'Empreinte Carbone et l'Économie Circulaire, Laboratoire des Technologies Alimentaires, Université de Boumerdes.
71. Hamitouche, Y. (2020). Etude d'aménagement hydraulique d'Oued Allala pour la protection de la ville de Ténès contre les inondations. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Hydraulique, option Conception des ouvrages hydrotechniques, École Nationale Supérieure de l'Hydraulique "le Mujahid Abdellah ARBAOUI".
72. GOOGLE EARTH
73. Document de la station. «UTE, desalodra Ténès Opération et Maitenimients O &M »,juin 2016.
74. Voutchkov, N. (2013). Desalination engineering: Planning and design. McGraw-Hill Education.
75. Veolia Water Technologies. (2015). ACTIFLO® PACK: Unités standardisées de clarification haute performance.
76. Adams, E., Connor, J., & Ochsendorf, J. (2006). Diagram of a typical ballasted flocculation system. 1.964 Design for Sustainability, Fall 2006. MIT OpenCourseWare. Civil and Environmental Engineering.
77. Veolia Water Technologies Canada. (2016, janvier 7). Actiflo® (Décantation lestée) [Vidéo]. YouTube.