



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

**Option: RÉUTILISATION DES EAUX NON CONVENTIONNELLES
(RENC)**

THEME :

Étude comparative entre le système de filtration Bicouche gravitaire et
pressurisée.

Étude de cas : Usine de dessalement d'eau de mer FOUKA II
(300 000 m³/j).

Présenté par :

BESSAFA Abd errahmane

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
DERNOUNI Youcef	M.A.A	Président
HOULI KHALED Samia	M.A.A	Examineur
KHEDIMALLAH Abderrahmane	M.C.B	Examineur
HACHEMI Abd elkader	M.C.A	Promoteur

Session..... 2024

Dédicace

À mes chers parents, ma mère et mon père,

À mon frère et à ma sœur bien-aimé,

Que ce travail soit une expression de ma gratitude et de mon amour pour vous.

Abd errahmane

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier **Allah** de m'avoir accordé la force de travailler et d'avoir fait de moi une personne réussie, ainsi que **mes parents** pour avoir toujours été là pour moi.

Je remercie chaleureusement **l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique** pour l'éducation de qualité et les ressources mises à ma disposition, qui m'ont permis de me développer académiquement et professionnellement.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers l'entreprise **Algerian Energy Company, Station de dessalement FOUKA II** pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon projet au sein de leur organisation.

Un grand merci à mon encadrant en entreprise, Mr **BABOURI ABDERRAHMANE**, et à mon encadrant d'école, Mr **HACHEMI ABDELKADER**, pour leurs précieux conseils et leur accompagnement tout au long du projet.

Un grand merci également à l'équipe d'ingénieurs de la station de dessalement fouka II, notamment BEN TEFIFA.Mourad, BOUMENDIL Mohamed, BENABDERRAHMANE AREZKI, BENLAHOUEL HADJ MESSAOUD, BENAYACH Mustapha, DJAMI Bilel, BENMIMOUN Zakaria, SAMEUR Aghiles Embarek, MESLEK Fouad, MORDJANE Khaled pour leur gentillesse et leur assistance inestimable.

ملخص

تُقارن هذه الدراسة بين أنظمة الترشيح ثنائية الوسائط الجاذبية والمضغوطة في محطة تحلية مياه البحر فوكا الثانية. يتم تحليل الأداء من حيث جودة المياه، والمساحة التي تشغلها الهيكل، وتكاليف البناء، والتكاليف التشغيلية، وكذلك متانتها وطول عمرها. الهدف هو تقديم توصيات مستنيرة لتنفيذ هذه التقنيات في المستقبل. في نهاية التحليل، تم الاستنتاج أن مرشحات الجاذبية كانت الخيار الأنسب لمحطة تحلية فوكا الثانية.

الكلمات المفتاحية الترشيح، التحلية، الجاذبية، المضغوط، التكاليف، المتانة

Abstract

This study compares the dual-media gravity and pressurized filtration systems at the Fouka II seawater desalination plant. Performance is analyzed in terms of water quality, space occupied by the structure, construction costs, operational costs, as well as their durability and longevity. The objective is to provide informed recommendations for the future implementation of these technologies. At the end of the analysis, it was concluded that gravity filters were the most suitable option for the Fouka II desalination plant.

Keywords : filtration, desalination, gravity, pressurized, costs, durability

Résumé

Cette étude compare les systèmes de filtration bicouche gravitaire et pressurisé à l'usine de dessalement d'eau de mer de Fouka II. La performance est analysée en termes de qualité de l'eau produite, de l'espace occupé par la structure, des coûts de construction et des coûts opérationnels, ainsi que de leur durabilité et longévité. L'objectif est de fournir des recommandations éclairées pour la mise en œuvre future de ces technologies. À la fin de l'analyse, il a été conclu que les filtres gravitaires étaient l'option la plus appropriée pour l'usine de dessalement de Fouka II.

Mots clés : filtration, dessalement, gravitaire, pressurisé, coûts, durabilité

Table des matières

	1
Nomenclature	
introduction	1
1 Présentation du site	3
1.1 Introduction	4
1.2 Présentation de la station de Fouka II	4
1.2.1 Localisation de la station :	4
1.2.2 Climatologie de la région :	5
1.3 Capacité de la station et son mode de fonctionnement :	6
2 Généralités sur le dessalement	8
2.1 Introduction	9
2.2 Histoire des technologies de désalinisation	9
2.2.1 Introduction	9
2.2.2 Les techniques de désalinisation thermique	9
2.3 Demandes en eau et solutions de désalinisation en Algérie	10
2.3.1 Besoins en eau et désalinisation en Algérie	10
2.3.2 Programme de renforcement AEP	11
2.4 Principes généraux du dessalement	13
2.4.1 types de dessalement :	14
3 Description du Processus d’Osmose Inverse	20
3.1 Introduction	21
3.2 La composition de l’eau de mer	21
3.3 Le processus d’osmose inverse (Reverse Osmosis (RO)) :	24
3.3.1 Défis et Problèmes du Dessalement par Technologie à Membrane	25
3.4 Les ouvrages assurant le bon fonctionnement de la technique :	27
3.5 Tour de prise (captage) :	27
3.6 Bassin de captage :	28

3.7	Clarificateur :	31
3.8	filtre à sable :	35
3.8.1	Types et Configurations de filtres :	38
3.8.2	Les filtres à gravité et filtres sous pression	39
3.8.3	Les filtres sous pression	42
3.8.4	Principaux avantages	43
3.9	Réservoir d'eau filtrée	44
3.9.1	Fonction principale	44
3.9.2	Conception et construction	45
3.9.3	Maintien de la qualité de l'eau	45
3.9.4	Capacité de stockage et gestion de la demande	45
3.9.5	Intégration avec le système de traitement avancé	46
3.9.6	Maintenance et surveillance	46
3.10	Bâtiment d'Osmose-Inverse	47
3.10.1	Les filtres à cartouche	47
3.10.2	Fonctionnement de l'Osmose Inverse	49
3.10.3	Efficacité et avantages	51
3.11	Bâtiment de reminéralisations	51
3.11.1	Nécessité de la reminéralisation	51
3.11.2	Processus de reminéralisation	51
3.11.3	Stockage de l'Eau Reminéralisée	52
3.12	Conclusion	53
4	calcul hydraulique pour le cas des filtres à sable Gravitaire	54
4.1	Introduction	55
4.2	Dimensionnement des collecteurs pour la Prise d'Eau	56
4.2.1	Choix du Diamètre Optimal	59
4.2.2	Section des conduites	59
4.2.3	Vérification des vitesses	59
4.2.4	calcul de perte de charge	62
4.2.5	Conclusion	64
4.3	Dimensionnement de la captage et importance du choix des pompes	64
4.4	calcul de La perte de charge totale entre ouvrage (bassin de captage et clarificateur)	72
4.5	Détermination de la hauteur géométrique	74
4.6	dimensionnement de filtre à sable	77
4.6.1	Le collecteur avec déversoir entre les canaux et le collecteur principal	86
4.7	Dimensionnement du clarificateur	88
4.8	Choix des pompes	94

4.8.1	calcul de la hauteur manométrique totale (HMT)	95
4.8.2	Débit par pompe	95
4.8.3	Sélection des pompes	95
4.8.4	Conclusion	95
5	Dimensionnement des systèmes de filtration Sous Pression	96
5.1	Introduction	97
5.2	Méthode de conception	97
5.3	Hypothèses de conception	98
5.3.1	Caractéristiques de conception des filtres	99
5.3.2	Choix des paramètres de conception	100
5.3.3	Procédures de nettoyage et tests de performance	101
5.3.4	Conception des diamètres des canalisations	102
5.3.5	Diamètre des tronçons le long du système de filtration	103
5.4	Conclusion	103
5.5	Station de pompage Intermédiaire pour Pressurisation des filtres	105
5.5.1	Importance de la station de pompage Intermédiaire	105
5.5.2	Choix des pompes pour la station de pompage Intermédiaire	106
5.5.3	Surveillance et maintenance de la station	106
6	Résultats et Interprétation	108
6.1	Introduction	109
6.2	Qualité de l'eau produite	109
6.2.1	Garanties opérationnelles	109
6.2.2	Comparaison des filtres multimédias gravitaire et pressurisé	109
6.3	Efficacité de filtration	111
6.3.1	Filtres gravitaire	111
6.3.2	Filtres pressurisés	111
6.3.3	Comparaison de l'efficacité de surface	111
6.4	Coûts de construction, fonctionnement et maintenance des filtres à média dual	112
6.4.1	Coûts de construction	112
6.4.2	Coûts de fonctionnement et de maintenance	113
6.5	Durabilité des structures	114
6.5.1	Comparaison de la durée de vie	115
6.6	Conclusion et recommandations	116
6.6.1	Principales constatations	116
6.6.2	Recommandations	117
	Conclusion Générale	118

Bibliographie

120

Table des figures

1.1	Carte de situation de fouka	5
2.1	La distillation à plusieurs étages flash (MSF)[3]	15
2.2	Distillation à plusieurs Effets (MED)[3]	16
2.3	la distillation par compression de vapeur (VCD) [3]	17
2.4	méthode de dessalement : l'électrodialyse[3]	18
3.1	Contenu principal de sel dans l'eau de mer[6]	23
3.2	Osmose et osmose inverse[3]	25
3.3	Mécanismes d'encrassement membranaire.	26
3.4	Rejet de saumure.[7]	27
3.5	Exemple de tours de captage[8]	28
3.6	Bassin de captage	29
3.7	Dégrilleurs	30
3.8	Tamis rotatif	31
3.9	Bassin de coagulation	33
3.10	Bassin de floculation station corso	34
3.11	Decanteur station corso	35
3.12	filtres à gravité à un seul étage à l'usine de dessalement SWRO de Gold Coast, Australie.[9]	41
3.13	filtres sous pression verticaux	43
3.14	filtres sous pression horizontaux	44
3.15	Schéma d'un Réservoir d'Eau filtrée	45
3.16	réservoir d'eau filtrée	46
3.17	Schéma de fonctionnement d'un filtre à cartouche dans un système de fil- tration d'eau.	48
3.18	Schéma de principe du système de filtration par osmose inverse montrant la séparation des molécules d'eau et des impuretés sous pression.	49
3.19	Mécanisme de la membrane d'osmose inverse montrant la séparation des molécules d'eau des impuretés.	50
3.20	Gestion de la saumure dans les systèmes d'osmose inverse.	50

3.21	Processus de reminéralisation	52
3.22	Réservoirs de Stockage pour l'Eau Reminéralisée	53
4.1	Schéma de filtre à gravité ouvert	55
4.2	plan de la tour de prise	56
4.3	Canal intérieur du filtre à sable	79
5.1	Schéma de système de filtration sous pression	97
5.2	Installation des filtres corso	100
5.3	Lavage par air et eau au fond des buses de filtration[9]	102
6.1	Coûts de construction des filtres gravitaires et pressurisés à média dual [10]	113

Liste des tableaux

1.1	Aperçu des Composants de l'Usine de Dessalement	6
1.2	Les Garanties Opérationnelles	7
2.1	technologies et processus de dessalement	14
3.1	Teneur en sel en surface de l'eau de mer :[6]	23
3.2	Caractéristiques des matériaux filtrants[9]	36
4.2	tableau des diametres des conduites en polyéthylène (PE)	59
4.3	Paramètres généraux	65
4.4	Perte de charge linéaire totale (hliniare total)	69
4.5	Perte de charge singulière pour aspiration (Asp) et refoulement (Ref) . . .	70
4.6	Perte de charge singulière pour aspiration (Asp) et refoulement (Ref) . . .	71
4.7	Perte de charge singulière totale (hsingulière total)	71
4.8	Données Fournies et calculées	72
4.9	Perte de charge linéaire	72
4.10	Perte de charge singulière pour $Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$	73
4.11	Perte de charge singulière pour $Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$	73
4.12	Perte de charge totale entre ouvrage (H total)	74
4.13	Les paramètres de réservoir d'eau filtrée à l'intérieur	75
4.14	Paramètres à l'entrée du réservoir d'eau filtrée	76
4.15	Paramètres du canal filtre à sable - réservoir d'Eau Filtrée	77
4.16	Paramètres du canal filtre à sable - collecteur	78
4.17	Paramètres du filtre à sable (Canal extérieur)	79
4.18	Paramètres du canal intérieur du filtre à sable	80
4.19	Les paramètres de la couche de filtre	81
4.20	Profondeur d'eau système de fonctionnement : normal	81
4.21	Profondeur d'eau système de fonctionnement : lavage	81
4.22	calcul deversoir eau clarifiée	82
4.23	Pertes de charge due aux ouvertures supérieur	83
4.24	Canal supérieur entre deux filtres à sable	85

4.25	Paramaters des canaux et le collecteur principal	86
4.26	conception du collecteur principal	87
4.27	Distribution principale du canal clarif-filtre	87
4.28	Calage et conception Décantier	89
4.29	Les ouvertures du décanteur	90
4.30	Canal (collecteur/deversoir) du décanteur	90
4.31	Bassin du décantation	91
4.32	Entre bassin du floc et décanteur	91
4.33	Bassin de floculation	92
4.34	calcul de perte de charge du déflecteur	92
4.35	Entre bassin du floc et coagulation	93
4.36	Bassin de coagulation	94
4.37	réservoir de mélange flash	94
5.1	paramètres de la station de Référence	98
5.2	filtres à double média—plage possible de vitesse de filtration [9]	99
5.3	Dimensions des couches de filtre	99
5.4	Caractéristiques de conception des filtres pour Variante 1 et Variante 2 . .	102
5.5	Caractéristiques de conception des filtres avec Différents Scénarios de Lavage	103
5.6	conception des Diamètres des Canalisations	103
5.7	Diamètres des Tronçons le Long du système de filtration	104
5.8	paramètres de la station Étudiée	105
6.1	Les Garanties opérationnelles	109
6.2	Comparaison de la qualité de l'eau produite des systèmes de filtration par gravité et sous pression	110
6.3	Spécifications des filtres gravitaires	111
6.4	Spécifications des filtres pressurisés	111
6.5	Fréquence de maintenance des composants principaux	114

Nomenclature

VC	Vapor Compression
VCD	Vapor Compression Distillation
MSF	Multi-Stage Flash Distillation
MED	Multi-Effect Distillation
ED	Electrodialysis
RO	Reverse Osmosis
RED	Reverse Electrodialysis
NF	Nanofiltration
MF	Microfiltration
UF	Ultrafiltration

Introduction

L'accès à une source d'eau potable demeure l'un des défis cruciaux du 21^{em} siècle, en particulier dans les régions arides et semi-arides du globe. Les technologies de dessalement d'eau de mer ont émergé comme une réponse prometteuse pour surmonter la pénurie d'eau, offrant une alternative vitale pour répondre aux besoins croissants en eau potable. Au cœur de ces technologies, les systèmes de filtration jouent un rôle déterminant, tant dans la qualité du produit final que dans l'efficacité opérationnelle des installations.

Cette étude se concentre spécifiquement sur la comparaison entre deux approches de filtration majeures : le système bicouche gravitaire et le système bicouche pressurisé. Nous orientons notre analyse en prenant comme exemple l'usine de dessalement d'eau de mer FOUKA II, actuellement en construction. En évaluant l'efficacité de son choix initial pour le système gravitaire, notre objectif est d'apporter des insights pertinents pour guider les décisions d'ingénierie à différentes étapes du processus de construction.

L'usine FOUKA II, en cours de construction, représente un cas d'étude intéressant. En choisissant d'implémenter un système bicouche gravitaire à ce stade initial du développement, les ingénieurs visent à tirer parti des avantages spécifiques de cette technologie. Les particularités de son environnement géographique et les défis liés à la phase de construction ajoutent une dimension significative à notre analyse, offrant des enseignements utiles pour les projets similaires à différentes étapes de leur conception. Bien que l'utilisation de filtres gravitaires ne soit pas courante dans les usines de dessalement, cette approche présente des avantages potentiels.

Les objectifs de cette étude comparative sont variés. Nous visons à évaluer les performances anticipées du système bicouche gravitaire sélectionné pour l'usine FOUKA II, en analysant son efficacité de filtration, ses coûts opérationnels, la qualité de l'eau produite, l'espace occupé par la structure, les coûts de construction, ainsi que sa durabilité et longévité. En extrapolant ces résultats, notre démarche vise à formuler des recommandations éclairées pour d'autres projets de dessalement d'eau de mer, qu'ils soient en phase de planification ou de construction. Cette étude cherche également à définir les paramètres de conception hydraulique en charge et par gravité, à identifier la solution optimale du

point de vue des performances, et à fournir des informations essentielles pour guider les décisions relatives à la conception et à la mise en œuvre des systèmes de filtration. Enfin, elle vise à développer une compréhension approfondie des avantages et des inconvénients associés à chaque approche étudiée.

En synthèse, cette étude aspire à contribuer à la prise de décision stratégique dans le domaine du dessalement d'eau de mer, en offrant une analyse anticipée et comparative entre deux systèmes de filtration essentiels, avec l'usine FOUKA II en tant que prototype d'application.

Chapitre 1

Presentation du site

1.1 Introduction

L'objectif de ce projet est de fournir une usine de dessalement d'eau de mer par osmose inverse d'une capacité de production nominale de 300 000 m³/j, grâce à deux (02) chaînes de production. L'usine produira de l'eau potable en respectant les normes de consommation. La conception du processus proposé était basée sur la vaste expérience de METITO dans la conception, la fabrication, l'exploitation et la maintenance des installations d'osmose inverse d'eau de mer. L'usine est conçue en deux chaînes de production plus ou moins indépendantes d'une capacité unitaire de 150000 m³/j, contenant chacune six (06) unités de dessalement permettant ainsi une meilleure disponibilité et fiabilité de l'usine. Toute la tuyauterie est conçue en conséquence.

1.2 Présentation de la station de Fouka II

1.2.1 Localisation de la station :

L'usine de dessalement est située à Fouka, dans la province de Tipasa, en Algérie. Elle se trouve à environ 20 kilomètres de la principale ville avoisinante et à environ 35 kilomètres à l'ouest de la capitale, Alger. Positionnée près de l'entrée de Fouka, à proximité de Douaouda Marine, elle occupe une superficie d'environ 1586 hectares.

Au nord se trouve la mer, tandis que Koléa se trouve au sud, Douaouda à l'est et Bou Ismail à l'ouest. L'accès au site est facilité par diverses routes, notamment la RN°11 menant à Alger ou Chlef, ainsi que par des routes locales telles que la N°110 vers Koléa ou la N°126 vers Bou Ismail.

De plus, à proximité immédiate vers l'est, se trouve l'Oued Mazafran, un élément environnemental significatif contribuant à la gestion des ressources en eau et à la préservation de l'écosystème local.



FIGURE 1.1 – Carte de situation de fouka

1.2.2 Climatologie de la région :

La région de Fouka présente un climat méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs, ainsi que des hivers doux et humides. Les caractéristiques typiques de ce climat sont les suivantes :

- **Méditerranée** : Ce climat se caractérise également par une variabilité saisonnière marquée, avec des périodes sèches et humides distinctes. Les précipitations sont concentrées en hiver, tandis que les étés sont généralement secs. Cette variation saisonnière est influencée par le déplacement des cellules de hautes pressions subtropicales, qui dominent en été et se déplacent vers le sud en hiver, permettant aux perturbations atmosphériques de pénétrer dans la région.
- **Saison d'été** : Les mois d'été dans la région de Fouka sont caractérisés par des températures élevées et des conditions sèches. Les températures maximales peuvent dépasser 30°C, avec des journées ensoleillées et un faible taux d'humidité. Cette période est influencée par la dominance de l'anticyclone subtropical et la réduction des précipitations. Les vents dominants viennent généralement du nord, ce qui contribue à maintenir des conditions chaudes et sèches.
- **Saison d'hiver** : Les mois d'hiver dans la région de Fouka sont caractérisés par des températures douces et des précipitations modérées. La température hivernale peut descendre en dessous de 10°C, mais reste généralement au-dessus de zéro. Les précipitations sont principalement moyennes, avec une augmentation de l'humidité atmosphérique due à l'influence des perturbations provenant de l'ouest. Les vents peuvent être variables, avec des périodes de calme relatif et d'autres de vents forts et humides, surtout près des côtes.

En résumé, la région de Fouka présente un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs, ainsi que des hivers doux et humides. La variabilité saisonnière est marquée,

avec des périodes distinctes de sécheresse estivale et de précipitations hivernales. Ces caractéristiques climatiques sont influencées par la position géographique de la région et les variations saisonnières des systèmes météorologiques dominants.

1.3 Capacité de la station et son mode de fonctionnement :

Dans le processus de traitement, la station comprend six (6) bassins de coagulation, douze (12) bassins de floculation, douze (12) bassins de décantation lamellaire, et trente-deux (32) filtres à sable.

En ce qui concerne la désalinisation, la station utilise le principe de l’Osmose Inverse (OI), avec douze (12) unités d’OI au total. Ces unités sont réparties équitablement entre deux lignes opérationnelles, chacune comprenant six (6) unités d’OI. Chaque unité est capable de traiter 25 000 m³ d’eau par jour. Il n’y a aucune unité de secours disponible.

Pour répondre aux besoins de la station, une alimentation en eau brute totale d’environ 666 667 m³ par jour est requise. Cette quantité est divisée de manière égale entre les deux lignes, nécessitant chacune environ 333 333 m³ d’eau brute par jour. Avec un taux de récupération de 45%, la station produit 300 000 m³ par jour. La production est planifiée sur une période de 24 heures, ce qui correspond à une moyenne de 27 778 m³ par heure.

TABLE 1.1 – Aperçu des Composants de l’Usine de Dessalement

Composant	Détails
Bassins de Coagulation	Total : 6 Par Ligne : 3
Bassins de Floculation	Total : 12 Par Ligne : 6
Bassins de Décantation Lamellaire	Total : 12 Par Ligne : 6
Filtre a sable	Total : 32 Par Ligne : 16
Unités d’Osmose Inverse (OI)	Total : 12 Par Ligne : 6
Capacité par Unité :	25 000 m ³ /jour
Capacité Totale :	300 000 m ³ /jour
Eau brute Total :	666 667 m ³ /jour

L’usine de dessalement assure les garanties opérationnelles suivantes pour la qualité

de l'eau traitée.

TABLE 1.2 – Les Garanties Opérationnelles

Paramètre	Valeur
pH	7,5 – 8,5
TDS (mg/l)	150 – 500
Bore (mg/l)	< 1,3
Dureté totale (mg/l en CaCO ₃)	80 – 150
Turbidité (NTU)	1 max
Chlore résiduel (mg/l)	0,1 – 0,3
Alcalinité (mg/l)	> 65
LSI	0 – 0,4

Chapitre 2

Généralités sur le dessalement

2.1 Introduction

Le dessalement de l'eau, est un processus industriel visant à transformer de l'eau salée ou saumâtre, principalement issue des océans, en eau douce. Son objectif est de répondre à la demande croissante en eau potable à l'échelle mondiale. Contrairement à ce que son nom pourrait laisser penser, le dessalement ne se résume pas à simplement retirer le sel de l'eau. Il s'agit plutôt d'extraire de l'eau douce à partir de sources initialement salées. Bien que le processus puisse sembler coûteux et complexe, il offre une solution précieuse dans les régions confrontées à une pénurie d'eau douce. Cependant, il convient de noter que, dans de nombreuses situations, il reste préférable d'exploiter et de traiter les sources naturelles d'eau douce, comme les lacs et les rivières, en raison de considérations économiques et environnementales. Le dessalement demeure néanmoins une option importante pour assurer un approvisionnement en eau fiable et durable là où les ressources en eau douce sont limitées.

2.2 Histoire des technologies de désalinisation

2.2.1 Introduction

La désalinisation a connu une croissance substantielle depuis le milieu des années 1960. En 1952, il n'y avait qu'environ 225 installations de désalinisation dans le monde entier, d'une capacité totale d'environ 100 000 m³/jour [1]. Aujourd'hui, on compte plus de 15 000 installations de désalinisation à travers le monde, avec une capacité globale dépassant les 65 millions de m³/jour [1]. Bien qu'il existe de nombreuses technologies de désalinisation en usage ou en cours de développement aujourd'hui, la désalinisation a commencé à utiliser des procédés thermiques. Les processus basés sur les membranes, tels que l'osmose inverse (RO), ont contribué à promouvoir davantage la désalinisation au cours des 30 dernières années.

2.2.2 Les techniques de désalinisation thermique

Multi-Effect Distillation (MED) a été la première technologie de désalinisation thermique utilisée. Les premières unités étaient équipées d'évaporateurs à tubes immergés présentant de faibles taux de transfert de chaleur et des taux d'entartrage élevés. Les évaporateurs à tubes verticaux et horizontaux, également connus sous le nom d'évaporateurs à film tombant, utilisés dans les installations MED modernes offrent des coefficients de transfert de chaleur plus élevés et des exigences de surface de transfert de chaleur spécifique inférieures à celles de leurs prédécesseurs plus anciens. Les inconvénients de la technologie MED actuelle sont sa complexité et ses capacités de production. De plus, la température

de saumure maximale relativement basse de la MED (65°C) en raison des problèmes de formation de tartre est une autre limitation de la MED. Cependant, l'utilisation d'un prétraitement membranaire tel que la Nanofiltration *Nanofiltration (NF) avant la MED pour éliminer le calcium qui contribue à la formation de tartre de sulfate de calcium dans les unités MED a été envisagée comme un moyen de permettre un fonctionnement à température plus élevée de la MED et ainsi d'améliorer son utilisation pour la désalinisation. En raison des problèmes initiaux avec la MED (par exemple, l'entartrage et les faibles taux de transfert de chaleur), la technologie de distillation multi-étage à flash *Multi-Stage Flash Distillation (MSF) a été développée à la fin des années 1950 et au début des années 1960 comme alternative. La distillation à flash a été utilisée commercialement pour la première fois par Westinghouse au Koweït en 1957. La même année, le brevet de distillation MSF a été délivré et en 1959/60, les premières installations commerciales MSF ont été installées au Koweït (19 étages, 4550 m³/j) et dans les îles Anglo-Normandes (40 étages, 2775 m³/j). En 1973, les unités MSF "standard", qui produisent 27 277 m³/j et se composent de 24 étages, ont été développées. Les développements récents dans la technologie de désalinisation thermique se sont concentrés sur les techniques de contrôle du tartre et de la corrosion ainsi que sur l'augmentation de la capacité de production des distillateurs. Les premières unités MSF, antérieures à 1980, étaient principalement construites en acier au carbone pour la coque et les éléments internes. La corrosion du métal due à l'eau de mer a conduit à l'utilisation de matériaux de construction plus épais, ce qui a rendu les unités plus grandes et plus lourdes. Les unités construites après 1980 utilisent de l'acier inoxydable et de l'acier inoxydable duplex pour réduire la corrosion, permettant ainsi des unités MSF plus légères et plus petites. Les progrès futurs dans la technologie se concentreront probablement sur les améliorations en thermodynamique et sur la sélection des matériaux.

2.3 Demandes en eau et solutions de désalinisation en Algérie

2.3.1 Besoins en eau et désalinisation en Algérie

À l'échelle mondiale, la gestion des ressources en eau est devenue une préoccupation primordiale, sous l'impulsion de divers facteurs. La rareté de l'eau est désormais reconnue comme un problème crucial, exacerbé par la croissance démographique, l'industrialisation et les impacts du changement climatique. L'accès à des sources d'eau propres et fiables est essentiel pour soutenir la vie, l'agriculture, l'industrie, le développement urbain et atténuer la dégradation environnementale. En Algérie, l'impératif de relever les défis liés aux ressources en eau est particulièrement marqué en raison d'une combinaison de

facteurs régionaux et locaux.

La dépendance du pays à l'égard de l'agriculture, pilier de son économie, souligne la nécessité d'un accès constant à l'eau à des fins d'irrigation. De plus, la croissance démographique rapide et l'urbanisation accélérée exercent une pression supplémentaire sur les ressources en eau, intensifiant la demande à des fins domestiques, industrielles et municipales. Les pressions environnementales telles que la désertification et les effets du changement climatique amplifient ces défis, exacerbant la tension sur des approvisionnements en eau déjà limités. Dans le contexte de ces dynamiques mondiales et régionales, l'adoption de la technologie de désalinisation émerge comme une stratégie cruciale pour augmenter les ressources en eau et garantir un accès durable à l'eau en Algérie. En diversifiant les sources d'eau et en réduisant la dépendance aux approvisionnements en eau douce conventionnels, la désalinisation offre une solution viable pour répondre aux besoins croissants en eau du pays face à des défis croissants.

2.3.2 Programme de renforcement AEP

Le programme de renforcement de l'Approvisionnement en eau potable s'inscrit généralement dans une démarche visant à améliorer de manière significative les infrastructures dédiées à la production d'eau potable. Cette initiative englobe un ensemble d'actions stratégiques qui embrassent divers aspects, allant de l'installation de nouvelles structures à la modernisation des infrastructures existantes, en passant par l'optimisation des réseaux de distribution. Dans cette perspective, il est également crucial d'envisager l'intégration de technologies innovantes, offrant des solutions efficaces pour garantir un approvisionnement en eau fiable et de haute qualité.

L'élaboration et la mise en œuvre de ces programmes requièrent une approche holistique, prenant en compte les multiples dimensions de la gestion de l'eau. Outre les aspects techniques liés à l'infrastructure, ces initiatives incluent également des volets de sensibilisation et d'éducation visant à promouvoir une utilisation responsable de l'eau. La sensibilisation des communautés locales et des usagers finaux est cruciale pour encourager des pratiques de consommation conscientes et durables.

par ailleurs, une gestion durable des ressources hydriques constitue un pilier essentiel de ces programmes de renforcement. Cela implique non seulement une utilisation efficace des ressources disponibles, mais aussi la mise en place de mécanismes de préservation et de restauration des écosystèmes aquatiques. Des stratégies de gestion intégrée de l'eau, impliquant une coordination entre les différents acteurs et parties prenantes, sont nécessaires pour assurer une utilisation équilibrée et équitable des ressources en eau, tout en préservant leur qualité et leur disponibilité pour les générations futures. Parmi les stations les plus notables en Algérie construites par Algerian Energy Company (AEC) ou en partenariat d'autres sociétés étrangères, on peut citer :

- Wilaya d'El tarf : avec une capacité de production de 50 000 m³/j.
- Wilaya de Chlef : une des stations de dessalement est située à ténès avec une capacité de production de 200 000 m³/j.
- Wilaya de tlemcen : comprend deux (02) stations de dessalement de capacité de 200 000 m³/j chacune, l'une est à Souk tlata et l'autre à Honaïne.
- Wilaya de Jijel : avec une capacité de production de 200 000 m³/j.
- Wilaya de Skikda : avec une capacité de 100 000 m³/j.
- Wilaya d'Oran : comprend quatre (04) stations de dessalement, citant les deux les plus grandes en point de vue production.
- Arzew pour une capacité de 90 000 m³/j.
- magtaa avec une capacité de 500 000 m³/j.
- Wilaya de Boumerdès : avec une capacité de 100 000 m³/j et 80 000 m³/j pour les stations Cap djinet I et Corso.
- Wilaya d'Ain témouchent : comprend les deux (02) stations Beni Saf et Chatt El Hilal avec une capacité de 200 000 m³/j chacune.
- Wilaya de tipaza : la station Fouka I avec une production de 120 000 m³/j.
- Wilaya d'Alger : comprend plusieurs stations, la plus grande est d'El Hamma avec une capacité de production de 200 000 m³/j et d'El marsa 60 000 m³/j.

Il convient également de noter l'existence d'autres petites stations de dessalement, dont la production moyenne est de 10 000 m³/jour ou moins.

Face à la pénurie d'eau potable observée au cours de l'été 2022, les autorités algériennes ont réagi en mettant en place un programme d'urgence visant la construction de cinq (05) nouvelles stations de dessalement au cours des années 2022-2024. Chacune de ces stations est conçue pour avoir une capacité de production de 300 000 m³/jour. Le maître d'ouvrage de ces projets est l'AEC. Ces nouvelles infrastructures sont cruciales pour répondre aux besoins croissants en eau potable du pays et pour pallier les défis posés par les périodes de sécheresse et les fluctuations de la demande en eau. on peut citer :

- Wilaya d'El tarf : l'Usine de dessalement d'eau de mer à Berrihane.
- Wilaya de Bejaia : l'UDEm à tighremt.
- Wilaya de Boumerdès : l'UDEm Cap Djinet II.
- Wilaya de tipaza : l'UDEm Fouka II.
- Wilaya d'Oran : l'UDEm Cap Blanc.

L'objectif principal de ces stations de dessalement est de garantir un approvisionnement en eau potable fiable pour la population, contribuant ainsi à réduire la dépendance aux ressources en eau conventionnelles. Outre cet aspect crucial, ces installations ont pour vocation de jouer un rôle stratégique dans l'atténuation des effets de la sécheresse, qui peuvent mettre en péril la disponibilité d'eau potable dans le pays.

En outre, ces nouvelles stations de dessalement sont également conçues pour renforcer la sécurité hydrique du pays. En diversifiant les sources d'approvisionnement en eau et en garantissant une disponibilité accrue d'eau potable, elles contribuent à réduire la vulnérabilité du pays aux variations climatiques et aux chocs externes susceptibles d'affecter l'accès à l'eau. Cette diversification des ressources en eau permet de créer une infrastructure résiliente, capable de faire face aux défis futurs liés à la disponibilité et à la distribution de l'eau.

Ainsi, ces stations de dessalement représentent une étape significative dans la stratégie globale de gestion des ressources en eau en Algérie, s'inscrivant dans une démarche visant à assurer un approvisionnement en eau potable durable, sûr et accessible à l'ensemble de la population, tout en renforçant la résilience du pays face aux défis environnementaux et climatiques.

2.4 Principes généraux du dessalement

Le dessalement peut être défini comme tout processus qui élimine les sels de l'eau. Les processus de dessalement peuvent être utilisés dans des applications municipales,

industrielles ou commerciales. Avec les améliorations technologiques, les processus de dessalement deviennent compétitifs en termes de coûts par rapport à d'autres méthodes de production d'eau utilisable pour nos besoins croissants.

Un processus de dessalement sépare essentiellement l'eau salée en deux parties - l'une ayant une faible concentration en sel (eau traitée ou eau produite), et l'autre avec une concentration beaucoup plus élevée que l'eau d'alimentation initiale, généralement appelée concentré salé ou simplement «concentré».

Les deux principaux types de technologies utilisées dans le monde pour le dessalement peuvent être largement classés comme étant thermiques ou membranaires. Les deux technologies nécessitent de l'énergie pour fonctionner et produire de l'eau douce. Dans ces deux catégories larges, il existe des sous-catégories (processus) utilisant différentes techniques. Les principaux processus de dessalement sont identifiés dans le tableau -.

TABLE 2.1 – technologies et processus de dessalement

technologie thermique	technologie à membrane
multi-Stage Flash Distillation (MSF)	Electrodialysis (ED)
multi-Effect Distillation (MED)	Reverse Electrodialysis (RED)
Vapor Compression Distillation (VCD)	Reverse osmosis (RO)

2.4.1 types de dessalement :

Il existe deux catégories de base de technologies de purification de l'eau utilisées pour le dessalement de l'eau de mer : les technologies membranaires et les processus de distillation (technologies thermiques). Certaines usines de purification d'eau utilisent une combinaison de ces technologies. Les technologies membranaires sont les plus couramment utilisées pour le dessalement d'eau de mer.

technologie thermique :

Les technologies thermiques, comme leur nom l'indique, impliquent le chauffage de l'eau salée et la collecte de la vapeur condensée (distillat) pour produire de l'eau pure. Les technologies thermiques ont rarement été utilisées pour le dessalement des eaux saumâtres en raison des coûts élevés associés. Cependant, elles ont été utilisées pour le dessalement de l'eau de mer et peuvent être subdivisées en trois groupes : la distillation à plusieurs étages flash (MSF), la distillation à plusieurs effets (MED) et la distillation par compression de vapeur (VCD).

1. **La distillation à plusieurs étages flash (MSF) :** Ce processus implique l'utilisation de la distillation à travers plusieurs chambres (multi-étages). Dans le processus

MSF, chaque étape successive de l'installation fonctionne à des pressions progressivement plus basses. L'eau d'alimentation est d'abord chauffée sous haute pression, puis dirigée dans la première "chambre de flash", où la pression est relâchée, provoquant une ébullition rapide de l'eau et donc une évaporation soudaine ou "flashing". Ce "flashing" d'une partie de l'eau d'alimentation se poursuit à chaque étape successive, car la pression à chaque étape est plus basse que dans l'étape précédente. La vapeur générée par le flashing est convertie en eau douce en étant condensée sur des tubes d'échange de chaleur qui traversent chaque étage. Les tubes sont refroidis par l'eau d'alimentation plus fraîche qui entre. Généralement, seule une petite partie de l'eau d'alimentation est convertie en vapeur et condensée. Les installations MSF sont sujettes à la corrosion à moins que l'acier inoxydable ne soit utilisé de manière extensive. En plus de la corrosion, les installations MSF sont également sujettes à l'érosion et à l'attaque par impact. L'érosion est causée par la turbulence de l'eau d'alimentation dans la chambre de flash, lorsque l'eau d'alimentation passe d'une étape à une autre. Les processus de distillation produisent environ 3,4 milliards de gallons par jour (GpJ) à l'échelle mondiale, ce qui représente environ 50% de la capacité mondiale de dessalement. Les installations MSF fournissent environ 84% de cette capacité. La plupart de ces installations ont été construites à l'étranger, principalement au moyen-Orient, où les ressources énergétiques ont été abondantes et peu coûteuses. [2]

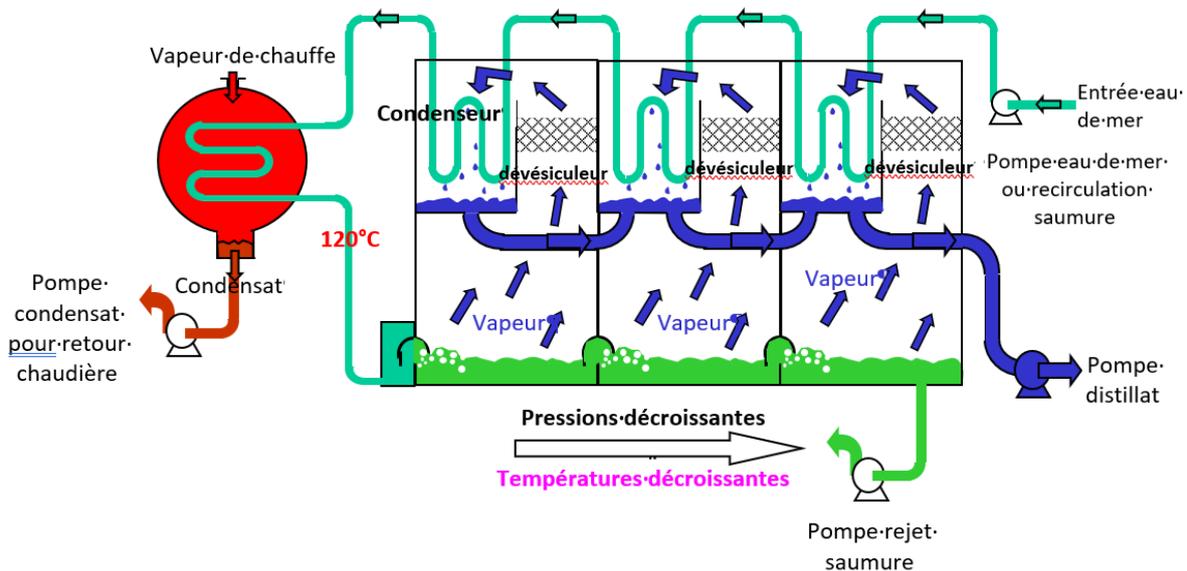


FIGURE 2.1 – La distillation à plusieurs étages flash (MSF)[3]

2. **Distillation à plusieurs Effets (MED)** : Le processus MED est utilisé depuis la fin des années 1950 et le début des années 1960[2]. La distillation à plusieurs effets se déroule dans une série de récipients (effets) et utilise les principes de l'évaporation et de la condensation à une pression ambiante réduite. Dans le MED, une série d'effets

d'évaporation produit de l'eau à des pressions progressivement plus basses. L'eau bout à des températures plus basses lorsque la pression diminue, donc la vapeur d'eau du premier récipient ou effet sert de milieu chauffant pour le deuxième, et ainsi de suite. plus il y a de récipients ou d'effets, plus le rapport de performance est élevé. En fonction de l'agencement des tubes d'échange de chaleur, les unités MED pourraient être classées comme à tubes horizontaux, à tubes verticaux ou à faisceaux de tubes empilés verticalement. [2]

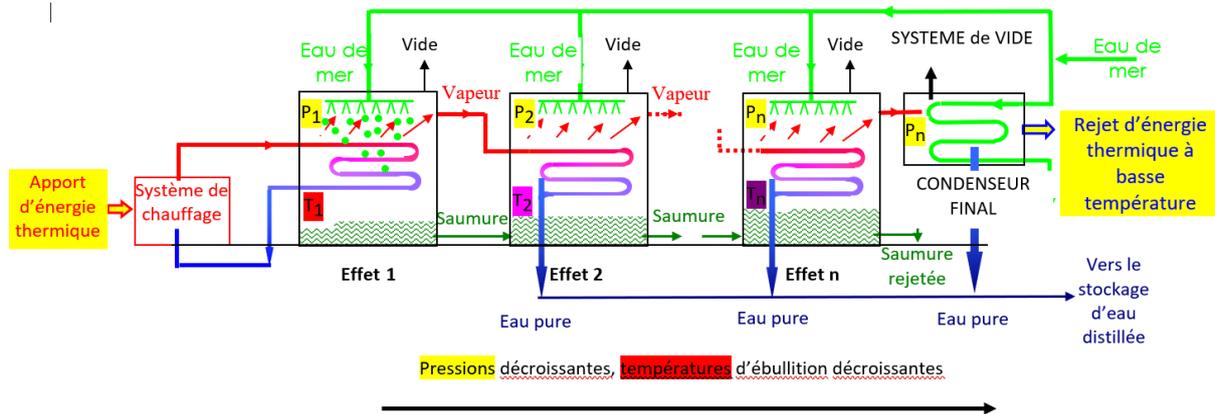


FIGURE 2.2 – Distillation à plusieurs Effets (MED)[3]

3. **La distillation par compression de vapeur (VCD) :** Le processus de distillation par compression de vapeur (VCD) est utilisé soit en combinaison avec d'autres processus tels que le MED, soit seul. La chaleur pour évaporer l'eau provient de la compression de la vapeur, plutôt que de l'échange direct de chaleur à partir de la vapeur produite dans une chaudière (Buros, 2000) [2]. Les unités de compression de vapeur (Vapor Compression (VC)) ont été construites dans une variété de configurations. Habituellement, un compresseur mécanique est utilisé pour générer la chaleur nécessaire à l'évaporation. Les unités VC sont généralement de faible capacité et sont souvent utilisées dans les hôtels, les stations balnéaires et dans les applications industrielles.

Défis et problèmes du dessalement thermique :

Les processus de dessalement thermique, tels que la MSF, la MED et la VCD, sont largement utilisés pour le dessalement de l'eau de mer. malgré leur efficacité dans la production d'eau douce, ces technologies thermiques rencontrent plusieurs défis et problèmes. Les principaux défis rencontrés par les technologies de dessalement thermique comprennent :

- La consommation élevée d'énergie : Les processus thermiques nécessitent une quantité significative d'énergie pour chauffer l'eau de mer et produire de la vapeur, ce

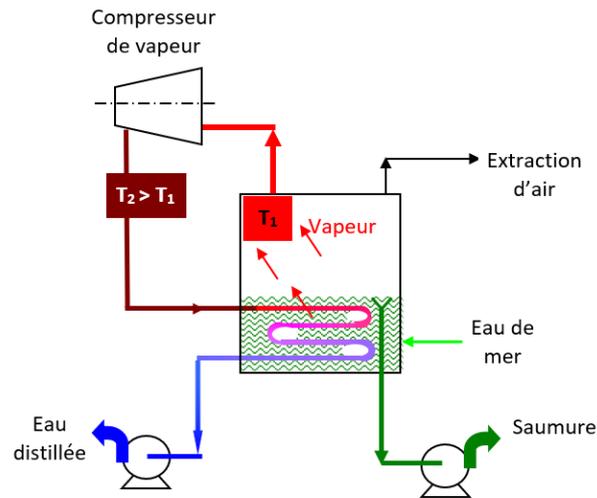


FIGURE 2.3 – la distillation par compression de vapeur (VCD) [3]

qui peut entraîner des coûts opérationnels élevés [4].

- La corrosion : Les équipements utilisés dans les processus thermiques sont souvent exposés à des environnements corrosifs en raison de la présence de sel dans l'eau de mer, ce qui peut entraîner une détérioration prématurée des composants [5].
- La gestion des concentrés : Les processus thermiques produisent généralement un concentré salé, qui doit être correctement éliminé ou géré pour éviter les impacts environnementaux négatifs [4].
- L'empreinte environnementale : Bien que les technologies thermiques produisent de l'eau douce, elles peuvent avoir un impact significatif sur l'environnement en raison de leur consommation d'énergie et de leurs émissions de gaz à effet de serre [5].

Ces défis nécessitent une attention particulière lors de la conception et de l'exploitation des installations de dessalement thermique afin d'assurer une performance optimale et une durabilité à long terme.

technologie à membrane :

Les technologies membranaires peuvent être subdivisées en deux catégories principales : l'électrodialyse/l'inversion d'électrodialyse (ED/RED) et l'osmose inverse (RO).

1. **Électrodialyse (ED) et Inversion d'Électrodialyse (RED)** : L'électrodialyse (ED) est un processus membranaire entraîné par une tension électrique. Un potentiel électrique est utilisé pour déplacer les sels à travers une membrane, laissant de l'eau douce derrière en tant qu'eau de produit. L'ED a été introduite commercialement dans les années 1960,[2] environ 10 ans avant l'osmose inverse (RO). Bien que l'ED ait été initialement conçue comme un processus de dessalement de l'eau de mer, elle

a généralement été utilisée pour le dessalement des eaux saumâtres. L'ED repose sur les principes généraux suivants :

- La plupart des sels dissous dans l'eau sont des ions, soit chargés positivement (cations), soit chargés négativement (anions).
- puisque des pôles similaires se repoussent et des pôles opposés s'attirent, les ions migrent vers les électrodes avec une charge électrique opposée.
- Des membranes adaptées peuvent être construites pour permettre le passage sélectif soit des anions, soit des cations.

Dans une solution saline, les ions dissous tels que le sodium (+) et le chlorure (-) migrent vers les électrodes opposées en passant à travers des membranes sélectionnées qui permettent le passage soit des cations, soit des anions (pas les deux). Les membranes sont généralement disposées selon un motif alterné, avec une membrane sélective pour les anions suivie d'une membrane sélective pour les cations. pendant ce processus, la teneur en sel du canal d'eau est diluée, tandis que des solutions concentrées se forment au niveau des électrodes. Des solutions concentrées et diluées sont créées dans les espaces entre les membranes alternées, et ces espaces délimités par deux membranes sont appelés cellules. Les unités d'ED se composent de plusieurs centaines de cellules liées ensemble avec des électrodes, et sont appelées des piles. L'eau d'alimentation passe à travers toutes les cellules simultanément pour fournir un flux continu d'eau dessalée et un flux constant de concentré (saumure) provenant de la pile.

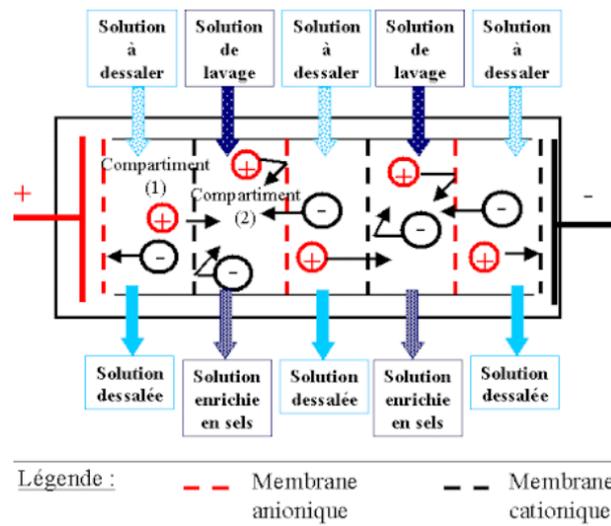


FIGURE 2.4 – méthode de dessalement : l'électrodialyse[3]

Dans les années 1970 [the_ABCs_of_Desalting], une société américaine a introduit commercialement le processus d'inversion d'électrodialyse (RED). Une unité d'RED fonctionne sur le même principe général qu'une installation d'électrodialyse

standard, à la différence que les canaux de produit et de saumure sont identiques dans leur construction. À intervalles de plusieurs fois par heure, la polarité des électrodes est inversée, et les flux sont simultanément basculés de sorte que le canal de saumure devienne le canal d'eau de produit, et que le canal d'eau de produit devienne le canal de saumure.

Le résultat est que les ions sont attirés dans la direction opposée à travers l'empilement de membranes. Immédiatement après l'inversion de polarité et de flux, l'eau de produit est évacuée jusqu'à ce que l'empilement et les conduites soient purgés et que la qualité de l'eau désirée soit rétablie. Ce rinçage ne prend que 1 ou 2 minutes, puis l'unité peut reprendre la production d'eau. Le processus d'inversion est utile pour briser et éliminer les incrustations, les dépôts organiques et autres dépôts dans les cellules avant qu'ils ne puissent s'accumuler et créer un problème. Le rinçage permet à l'unité de fonctionner avec moins de produits chimiques de prétraitement et réduit l'encrassement des membranes.

L'RED présente les caractéristiques suivantes qui le rendent adapté à plusieurs applications :

- Capacité de récupération élevée (plus de produit et moins de saumure).
- Consommation d'énergie proportionnelle aux sels éliminés.
- Capacité à traiter l'eau d'alimentation avec un niveau plus élevé de solides en suspension que l'RO.
- Inensible aux substances non ioniques telles que le silice.
- Faible utilisation de produits chimiques pour le prétraitement.

Les unités d'RED sont généralement utilisées pour dessaler l'eau saumâtre. Le principal besoin énergétique est le courant continu utilisé pour séparer les substances ioniques dans l'empilement de membranes.

Chapitre 3

Description du Processus d'Osmose Inverse

3.1 Introduction

L'eau de mer, en tant que ressource omniprésente mais souvent sous-utilisée en raison de sa salinité, offre une opportunité cruciale pour répondre à la demande croissante en eau potable à l'échelle mondiale. Pourtant, son utilisation nécessite une compréhension approfondie de sa composition chimique, en particulier dans le contexte du processus de dessalement. Ce dernier, étant une entreprise stratégique pour la sécurité hydrique, exige une connaissance précise des composants de l'eau de mer et des impuretés qu'elle contient. Cette introduction vise à établir une base conceptuelle solide en examinant la composition de l'eau de mer, en identifiant les principales substances présentes, et en exposant les défis inhérents à leur élimination lors du processus de dessalement. En somme, ce préambule fournira un cadre analytique nécessaire pour aborder de manière rigoureuse les diverses méthodes et technologies employées dans le dessalement de l'eau de mer.

3.2 La composition de l'eau de mer

L'eau de mer contient une multitude d'éléments organiques et inorganiques. Ils se présentent sous forme dissoute, en suspension, très finement répartis ou colloïdaux. Les constituants dissous de l'eau de mer peuvent être regroupés en catégories principales suivantes :

1. Les constituants principaux inorganiques qui forment la teneur en sel de l'eau de mer, avec ses composants cationiques et anioniques.
2. Les substances inorganiques présentes dans l'eau de mer uniquement en petites quantités ou traces, c'est-à-dire dans la gamme des microgrammes.
3. Les gaz dissous, tels que l'oxygène, l'azote et le dioxyde de carbone.
4. Les constituants organiques dissous qui sont produits par des processus biologiques et chimiques naturels (par exemple, sous forme de métabolites et de produits de décomposition de la vie marine), appelés matières organiques naturelles (MON).

L'eau de mer contient également des substances organiques et inorganiques non dissoutes, présentes dans un état suspendu, finement réparti ou très finement réparti. La matière organique est présente à la fois sous forme inanimée et sous forme de microbes et de micro-organismes (algues, plancton, bactéries, etc.). La matière en suspension est généralement un mélange de substances organiques et inorganiques, ainsi que de substrats organiques vivants.

Particulièrement dans les régions côtières densément peuplées et fortement industrialisées, diverses substances organiques ou inorganiques peuvent pénétrer dans la mer après

avoir été rejetées dans les effluents industriels et les eaux usées traitées. Cela peut affecter la composition de l'eau de mer, notamment en ce qui concerne ses concentrations en métaux lourds dissous, hydrocarbures, tensioactifs et nutriments, ainsi que son contenu en substances non dissoutes. Cela entraîne une détérioration significative de la qualité de l'eau. La navigation le long des routes maritimes très fréquentées ainsi que l'extraction en mer de pétrole brut et de gaz naturel peuvent également avoir des impacts locaux, mais de plus en plus étendus, sur la qualité de l'eau de mer. Un autre problème est la pollution progressive des océans par les déchets plastiques. Les substances organiques naturelles et d'origine humaine, ainsi que l'activité biologique dans l'eau de mer, ont un impact très significatif sur le fonctionnement et la disponibilité des processus techniques utilisant l'eau de mer. C'est particulièrement le cas pour les procédés membranaires de dessalement de l'eau de mer. Toutes les substances naturelles présentes sur Terre ont été retrouvées dans l'eau de mer, à la fois en concentrations élevées, comme les principaux constituants du sel présent dans l'eau de mer, et aussi en concentrations très faibles et minuscules dans les substances traces de l'eau de mer. La teneur en sel des mers et des océans de la Terre varie énormément (voir Tableau 3.1). La teneur en sel varie de façon très basse, de 3 à 8 g/kg dans la mer Baltique, à une moyenne de 32 à 38 g/kg dans l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Indien, pour atteindre des valeurs de salinité maximales de 42 g/kg dans la mer Rouge et parfois même jusqu'à 49 g/kg dans le golfe Arabique. Le sel contenu dans l'eau de mer se compose principalement de six composants salins, à savoir les cations sodium, magnésium, calcium et potassium et les anions chlorure et sulfate. Ces composants salins représentent plus de 99% de la teneur totale en sel de l'eau de mer (voir Fig. 2.1). Les environ 1% restants de la teneur en sel se composent principalement des cations strontium et baryum et des anions bicarbonate, carbonate, bromure, borate, fluorure et nitrate. En ce qui concerne les six principaux composants du sel contenu dans l'eau de mer, le ratio de leurs concentrations respectives en grammes de substance dissoute par kilogramme d'eau de mer à la teneur totale en sel de l'eau de mer en grammes par kilogramme - mais aussi le ratio de leurs concentrations les uns par rapport aux autres - est globalement constant indépendamment de la teneur en sel de l'eau de mer. Ce principe de proportions constantes - également connu sous le nom de principe de Forchhammer ou de Marcet d'après les océanographes qui ont d'abord étudié ce phénomène naturel au XIXe siècle et l'ont formalisé en tant que loi - permet, avec la connaissance de la concentration d'un seul des principaux composants de la teneur en sel dans un échantillon d'eau de mer, d'estimer la teneur totale en sel ainsi que les concentrations des autres principaux composants.

TABLE 3.1 – Teneur en sel en surface de l'eau de mer :[6]

Mer ou océan	Teneur en sel (g/kg)
Mer Baltique	3-8
Océan Atlantique	32-38
Mer Méditerranée	38-40
Mer Caspienne	10-15
Océan Pacifique	32-36
Océan Indien	32-38
Mer Rouge	38-42
Golfe Persique	41-49

Les composants salins inorganiques de l'eau de mer non inclus parmi les composants principaux susmentionnés, en particulier ceux qui se trouvent à de petites ou infimes concentrations ainsi que les composés impliqués dans les processus biologiques et chimiques, peuvent être soumis à des variations locales et saisonnières très significatives.

Le principe des proportions constantes est le plus valable en haute mer. Près de la côte, notamment dans les eaux côtières peu profondes, les estuaires de fleuves ou les baies marines, même les principaux constituants de l'eau de mer sont sujets à des anomalies, c'est-à-dire des écarts par rapport au principe des proportions constantes.

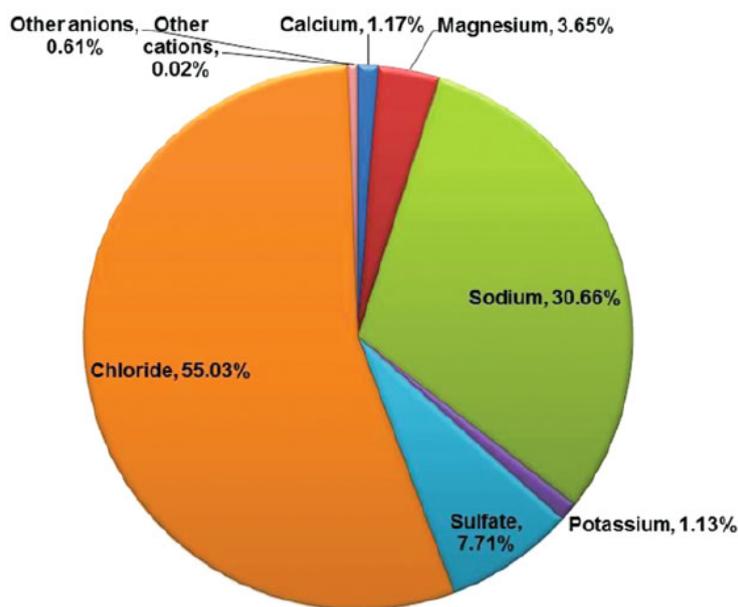


FIGURE 3.1 – Contenu principal de sel dans l'eau de mer[6]

3.3 Le processus d'osmose inverse (RO) :

Utilise la pression comme force motrice pour pousser l'eau saline à travers une membrane semi-perméable dans un flux d'eau de produit et un flux de saumure concentrée. NF est également un processus membranaire utilisé pour l'élimination des ions de sels divalents tels que le calcium, le magnésium et le sulfate. En revanche, l'RO est utilisée pour l'élimination du sodium et du chlorure. Les processus d'RO sont utilisés pour dessaler l'eau saumâtre (TDS > 1 500 mg/l)[2] et l'eau de mer. Le processus est expliqué ci-dessous : L'osmose est un phénomène naturel par lequel l'eau d'une faible concentration en sel passe dans une solution plus concentrée à travers une membrane semi-perméable. Lorsqu'une pression est appliquée à la solution avec une concentration en sel plus élevée, l'eau va s'écouler dans une direction inverse à travers la membrane semi-perméable, laissant le sel derrière elle. C'est ce qu'on appelle le processus d'osmose inverse ou processus d'RO. Une usine de dessalement par RO se compose essentiellement de quatre systèmes majeurs :

1. Système de prétraitement
2. Pompes haute pression
3. Systèmes de membranes
4. Post-traitement

Le prétraitement est très important dans le RO car les surfaces des membranes doivent rester propres. Par conséquent, tous les solides en suspension doivent d'abord être éliminés, et l'eau prétraitée de sorte que la précipitation du sel ou la croissance microbienne ne se produisent pas sur les membranes. Le prétraitement peut impliquer des méthodes conventionnelles telles qu'une alimentation chimique suivie de coagulation/floculation/sédimentation, et filtration sur sable, ou le prétraitement peut impliquer des processus membranaires tels que Microfiltration (MF) et Ultrafiltration (UF). Le choix d'un processus de prétraitement particulier est basé sur un certain nombre de facteurs tels que la qualité de l'eau d'alimentation, disponibilité d'espace, exigences des membranes de RO, etc. Les pompes haute pression fournissent la pression nécessaire pour permettre à l'eau de passer à travers la membrane et rejeter le sel. Les pressions vont d'environ 150 psi pour une eau saumâtre légère à 800 - 1,000 psi [2] pour l'eau de mer. L'ensemble de la membrane se compose d'un récipient sous pression et d'une membrane semi-perméable à l'intérieur qui permet à l'eau d'alimentation de passer à travers elle. Les membranes de RO pour le dessalement viennent généralement en deux types : enroulement en spirale et fibres creuses. Les éléments enroulés en spirale sont en fait construits à partir de membranes en feuille plate. Les matériaux de membrane peuvent être constitués d'acétate de cellulose ou d'autres polymères composites. Dans la conception enroulée en spirale, l'enveloppe de la membrane est enroulée autour d'un tube collecteur central. L'eau d'alimentation sous pression s'écoule

en spirale à l'intérieur de l'enveloppe de membrane, et l'eau pure (désalinisée) est collectée dans le tube central. Comme une partie de l'eau passe à travers la membrane, l'eau d'alimentation restante augmente en teneur en sel. Une partie de l'eau d'alimentation est évacuée sans passer à travers la membrane. Sans cette décharge, l'eau d'alimentation sous pression continuerait à augmenter en teneur en sel, provoquant la sur-saturation des sels. La quantité d'eau d'alimentation évacuée en tant que concentré varie d'environ 20% [2] pour l'eau saumâtre à environ 50 % [2] pour l'eau de mer.

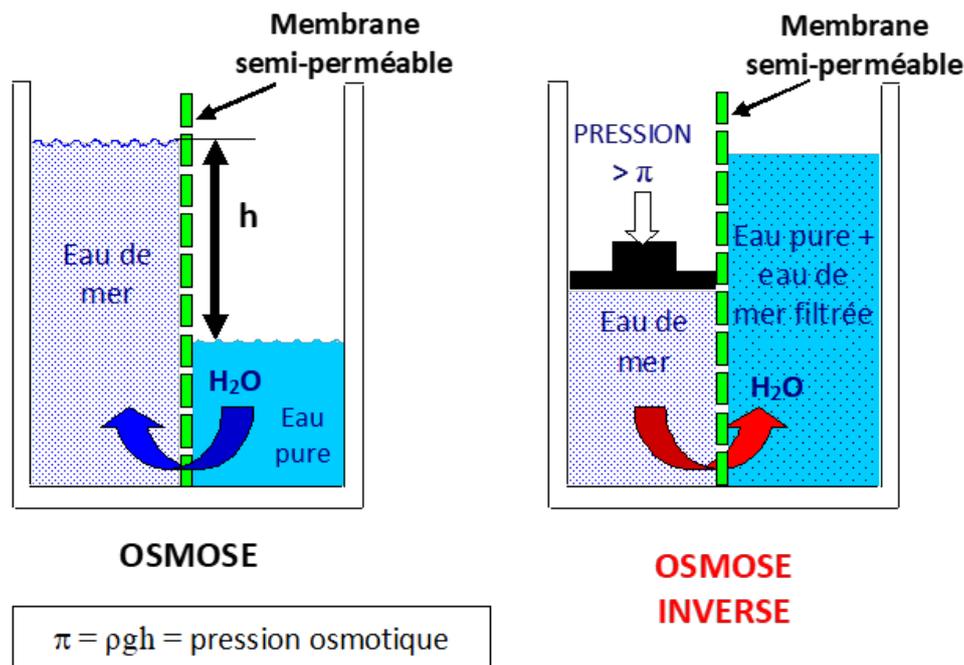


FIGURE 3.2 – Osmose et osmose inverse[3]

3.3.1 Défis et Problèmes du Dessalement par Technologie à Membrane

Le dessalement par technologie à membrane, représenté principalement par l'osmose inverse (RO) et la nanofiltration (NF), est largement reconnu comme une méthode efficace pour produire de l'eau douce à partir de sources d'eau salée. Cependant, malgré ses avantages, cette approche présente plusieurs défis et problèmes qui nécessitent une attention particulière. Parmi ces défis figurent la performance des membranes, la formation de dépôts, la gestion des rejets, et l'empreinte énergétique.

- **Performance des Membranes** : La performance des membranes est un aspect crucial du dessalement par technologie à membrane. Bien que les membranes modernes aient considérablement amélioré leur efficacité et leur durabilité, des problèmes persistent. Ces problèmes incluent la réduction du débit d'eau due à l'encrassement des

membranes par des particules et des sels, ainsi que la dégradation de la performance due à des conditions opérationnelles extrêmes telles que des températures élevées ou des pH extrêmes.

- **Formation de Dépôts** : La formation de dépôts sur les membranes est un défi majeur dans le dessalement par technologie à membrane. Les dépôts, tels que le biofouling, le scaling et la formation de colloïdes, réduisent l'efficacité de la membrane et nécessitent des procédures de nettoyage fréquentes, augmentant ainsi les coûts opérationnels.

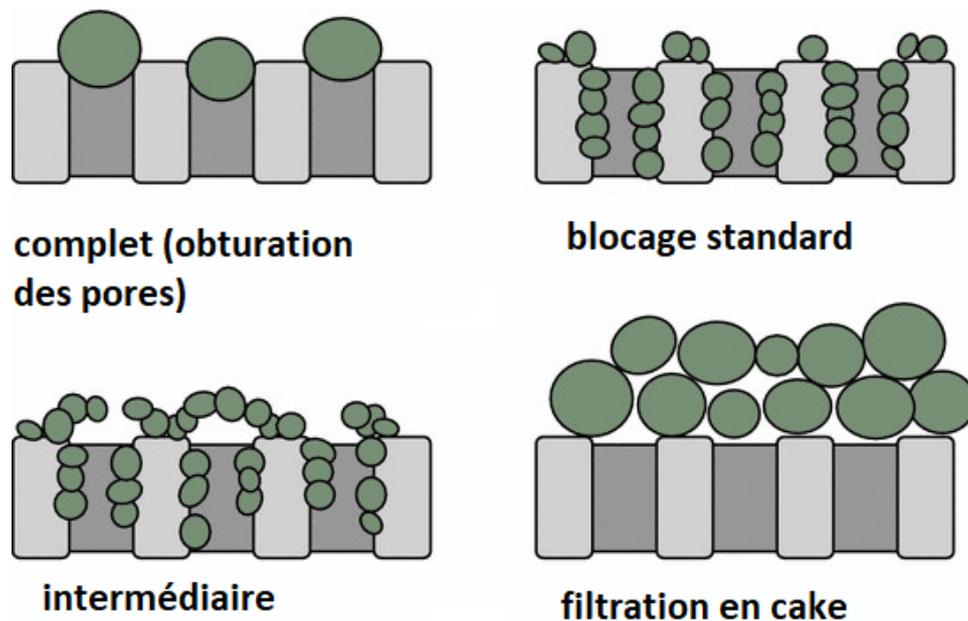


FIGURE 3.3 – Mécanismes d'encrassement membranaire.

- **Gestion des Rejets** : La gestion des rejets est une préoccupation environnementale majeure associée au dessalement par technologie à membrane. Les concentrés rejetés, contenant une concentration élevée de sels et d'autres contaminants, peuvent avoir un impact néfaste sur les écosystèmes marins s'ils sont rejetés directement dans l'environnement. Par conséquent, des mesures de gestion appropriées doivent être mises en place pour minimiser les impacts environnementaux.
- **Empreinte Énergétique** : L'empreinte énergétique du dessalement par technologie à membrane est un autre défi important. La pression requise pour forcer l'eau à travers les membranes est généralement élevée, ce qui entraîne une consommation d'énergie significative. Réduire cette empreinte énergétique est un objectif clé pour rendre le dessalement par technologie à membrane plus durable et économiquement

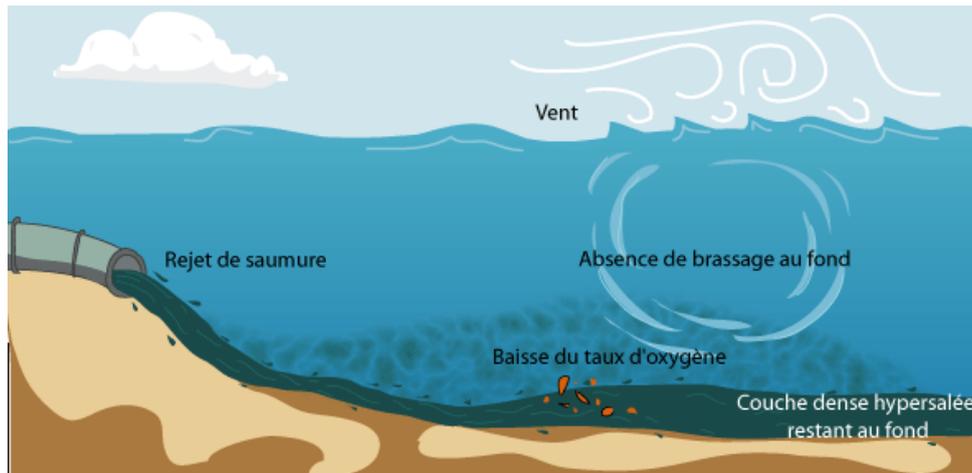


FIGURE 3.4 – Rejet de saumure.[7]

viable.

En somme, malgré ses avantages indéniables, le dessalement par technologie à membrane est confronté à plusieurs défis qui nécessitent une recherche continue et des efforts d'innovation pour surmonter.

3.4 Les ouvrages assurant le bon fonctionnement de la technique :

Pour garantir le fonctionnement optimal de l'usine et atteindre les normes de qualité requises, un ensemble d'ouvrages de traitement est soigneusement mis en place. Ces ouvrages constituent le cœur de l'usine de dessalement, orchestrant un processus méticuleusement conçu pour transformer l'eau de mer en eau potable de haute qualité. Chaque étape de ce processus, minutieusement planifiée et exécutée, joue un rôle crucial dans la purification de l'eau de mer, respectant un séquençage précis pour assurer son efficacité. De la prétraitement initial à la post-traitement final, chaque ouvrage est soigneusement conçu et intégré dans un schéma global qui vise à éliminer les impuretés et à garantir la sécurité et la pureté de l'eau potable produite.

3.5 Tour de prise (captage) :

Un ouvrage immergé est une structure installée sous l'eau, généralement à une profondeur d'environ 13 mètres en mer (offshore), conçue pour collecter l'eau de mer et la transporter vers un bassin de captage situé à terre (on-shore). Utilisant la pression hydrostatique naturelle, cet ouvrage permet à l'eau de mer de se déplacer sans nécessiter de pompe mécanique, réduisant ainsi la consommation d'énergie. Construit avec des maté-

riaux résistants à la corrosion et capable de supporter les forces hydrodynamiques comme les courants et les vagues, il est souvent utilisé pour approvisionner les usines de dessalement et les installations industrielles nécessitant de l'eau de mer. Malgré les défis liés à l'installation et à l'entretien sous -marin, tels que la corrosion et l'inspection régulière, ces ouvrages offrent une solution écologique et efficace pour la collecte d'eau de mer, minimisant l'impact environnemental par rapport à d'autres méthodes plus invasives.

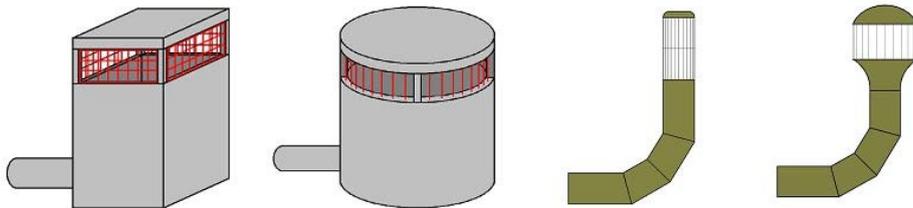


FIGURE 3.5 – Exemple de tours de captage[8]

3.6 Bassin de captage :

C'est le premier ouvrage de la partie on-shore de la station, destinée à collecter l'eau brute (eau de mer). Conçu en béton, il a une forme rectangulaire au début, puis il prend une forme trapézoïdale au niveau de l'aspiration des pompes. Cette conception est stratégique, car la forme rectangulaire permet une large ouverture pour la collecte initiale, tandis que la transition vers une forme trapézoïdale facilite l'accélération du flux d'eau vers les pompes, augmentant ainsi l'efficacité du pompage. Au début de cet ouvrage, un piège à sable est installé pour retenir le sable et les particules solides plus lourdes. Ce dispositif joue un rôle crucial en empêchant ces éléments de pénétrer plus loin dans le système de traitement, ce qui pourrait entraîner l'usure prématurée des équipements et une diminution de l'efficacité du processus de traitement de l'eau. Ce piège à sable est souvent constitué de compartiments ou de zones de décantation où les particules lourdes peuvent se déposer sous l'effet de la gravité avant que l'eau ne continue son parcours. La maintenance régulière de ce piège est essentielle pour assurer qu'il reste fonctionnel et efficace, prévenant ainsi les blocages et les dommages potentiels aux pompes et aux conduites en aval. Ce premier ouvrage est donc un élément clé dans la chaîne de traitement, assurant une protection initiale et une pré-filtration de l'eau brute avant qu'elle n'entre dans les étapes plus complexes de purification et de traitement.



FIGURE 3.6 – Bassin de captage

De plus, cet ouvrage comprend des composants importants comme :

- **Dégrilleurs** : Les dégrilleurs jouent un rôle essentiel dans le processus de traitement de l'eau en filtrant les grosses particules indésirables provenant de la mer, telles que les poissons, les algues et d'autres débris. Installés en amont des systèmes de traitement, ces dispositifs mécaniques sont composés de grilles ou de tamis métalliques à mailles plus ou moins fines, permettant de retenir les objets volumineux avant qu'ils n'endommagent les équipements sensibles en aval. Le fonctionnement des dégrilleurs repose sur le passage de l'eau à travers ces grilles, où les débris sont piégés et ensuite retirés manuellement ou automatiquement, selon la conception du système. Leur efficacité dépend de la taille des mailles et de la vitesse de l'eau, et ils sont souvent équipés de systèmes de nettoyage automatique pour éviter les obstructions et maintenir une efficacité optimale. En plus de protéger les équipements de pompage et de traitement, les dégrilleurs contribuent à réduire les coûts de maintenance et à prolonger la durée de vie des installations en empêchant les accumulations de matières organiques et inorganiques. Ils sont indispensables pour garantir une première étape de filtration efficace, assurant ainsi que l'eau qui pour-

suit son chemin vers les processus de traitement plus sophistiqués est débarrassée des plus gros contaminants.



FIGURE 3.7 – Dégrilleurs

- **Les tamis rotatifs** : également connus sous le nom de tamis rotatifs à tambour, jouent un rôle vital dans les processus de désalinisation des eaux. Dans les installations de dessalement, où l'eau de mer est traitée pour en retirer le sel et les impuretés, les tamis rotatifs sont souvent utilisés pour éliminer les débris et les particules grossières présents dans l'eau de mer brute. Ces tamis fonctionnent en faisant tourner un tambour perforé ou une surface filtrante à l'intérieur duquel l'eau de mer est introduite. Les particules solides de plus grande taille sont retenues à la surface du tambour tandis que l'eau passe à travers les perforations. Pour les installations de dessalement, la fiabilité et l'efficacité des tamis rotatifs sont essentielles pour assurer un fonctionnement continu et une production d'eau potable de qualité. Les tamis rotatifs sont conçus pour résister aux environnements corrosifs et aux charges de particules élevées typiques de l'eau de mer, ce qui en fait un choix idéal pour ces applications. De plus, leur capacité à traiter de grandes quantités d'eau de manière efficace en fait un composant précieux dans les installations de dessalement, où la productivité et la performance sont des priorités. En conclusion, les tamis rotatifs jouent un rôle crucial dans les processus de dessalement en éliminant les débris et les particules grossières de l'eau de mer brute, contribuant ainsi à la production.



FIGURE 3.8 – Tamis rotatif

- **La bache d'eau de mer :** est un élément essentiel des installations de dessalement. Elle se compose d'un réservoir, généralement souterrain, et d'une station de pompage. Cette structure est conçue pour stocker l'eau de mer brute avant qu'elle ne soit traitée dans le processus de dessalement. Le réservoir offre une capacité de stockage importante, permettant d'assurer un approvisionnement constant en eau de mer pour les unités de dessalement, même en cas de fluctuations de la demande ou des conditions météorologiques. La station de pompage, située généralement à proximité du réservoir, est responsable de pomper l'eau de mer brute depuis la bache vers les étapes de traitement du dessalement. Ces stations de pompage sont équipées de pompes puissantes capables de gérer de grands volumes d'eau de mer à des pressions variées, garantissant ainsi un flux constant vers les installations de dessalement.

3.7 Clarificateur :

Cet ouvrage, intégrant des processus de clarification et de coagulation-floculation, revêt une importance cruciale dans le traitement des eaux usées et des eaux de surface pour les rendre propres à la consommation ou à d'autres usages industriels. En amont du processus de clarification, les particules présentes dans l'eau brute sont classées en trois

principales catégories : les matières en suspension (MES), les matières colloïdales et les matières dissoutes (TDS). Parmi celles-ci, les particules colloïdales sont particulièrement problématiques en raison de leur taille extrêmement petite et de leur grande stabilité, ce qui les rend peu susceptibles de se déposer naturellement et de nécessiter des méthodes spéciales pour leur élimination.

La turbidité et la couleur de l'eau sont principalement attribuables à ces particules colloïdales, qui peuvent persister dans l'eau pendant des périodes prolongées. Pour traiter efficacement ces colloïdes, le processus de coagulation-floculation est mis en œuvre. La coagulation implique l'ajout d'un coagulant, souvent un sel de fer ou d'aluminium, qui réagit avec les particules colloïdales pour neutraliser leur charge électrique et former des agrégats plus larges appelés floes.

L'objectif principal de la coagulation est de réduire le potentiel zêta des particules à zéro. Le potentiel zêta représente la charge électrique à la surface des particules colloïdales et joue un rôle crucial dans leur stabilité. En réduisant le potentiel zêta à zéro, on neutralise la répulsion électrostatique entre les particules, ce qui favorise leur agglomération et leur précipitation ultérieure.

Il est essentiel de noter que le choix du coagulant et des conditions de traitement, tels que le pH et la concentration de coagulant, affecte considérablement l'efficacité de la coagulation. En général, plus la charge du cation associé au coagulant est élevée, meilleure est l'efficacité de la coagulation. Ainsi, en contrôlant attentivement ces paramètres, les usines de traitement des eaux peuvent garantir une élimination efficace des particules colloïdales, contribuant ainsi à la production d'eau propre et conforme aux normes de qualité requises pour diverses applications.

- **Coagulation** : La déstabilisation des particules colloïdales est un processus crucial dans le traitement de l'eau, visant à faciliter l'élimination des particules en suspension.

Les particules colloïdales, d'une taille variant entre 1 nanomètre et 1 micromètre, demeurent en suspension à cause de leurs charges électriques similaires, générant ainsi une force répulsive qui empêche leur agglomération.

Pour surmonter cette répulsion et permettre l'agglomération des particules, des coagulants comme le Chlorure Ferrique (FeCl_3) sont utilisés. Lorsqu'il est ajouté à l'eau, le Chlorure Ferrique se dissocie en ions ferriques (Fe^{3+}), qui sont hautement chargés positivement.

Ces ions interagissent avec les particules colloïdales chargées négativement, réduisant la force de répulsion électrostatique entre elles. Une fois les charges neutralisées, les particules peuvent se rapprocher et former des floes plus gros dans un processus appelé floculation.

Ces floes sont des agrégats de particules colloïdales qui deviennent suffisamment

lourds pour se déposer plus rapidement au fond du bassin de décantation, facilitant ainsi leur élimination. L'efficacité du processus de coagulation dépend fortement de l'homogénéité du mélange entre le coagulant et les particules colloïdales.

Pour assurer une distribution uniforme du Chlorure Ferrique et maximiser les interactions avec les colloïdes, un agitateur à haute vitesse est utilisé.

Cet agitateur permet de maintenir une turbulence adéquate dans le mélange, favorisant ainsi le contact entre les ions ferriques et les particules colloïdales. La vitesse de l'agitateur doit être suffisante pour garantir une bonne dispersion du coagulant sans pour autant provoquer une désintégration des floccs déjà formés.

Le temps de contact entre le coagulant et les particules est également un facteur crucial. Une bonne homogénéité doit être atteinte rapidement pour que le processus de floculation puisse se poursuivre efficacement. En général, une phase de mélange rapide est suivie d'une phase de mélange lent, où les floccs peuvent croître en taille sans être brisés par une agitation excessive.

Ainsi, la déstabilisation des particules colloïdales avec le Chlorure Ferrique et une agitation adéquate permet une agglomération rapide et efficace des particules, facilitant leur décantation et contribuant de manière significative à la clarification de l'eau.



FIGURE 3.9 – Bassin de coagulation

- **Floculation** :Après la coagulation, l'eau est acheminée vers la zone de floculation, une étape cruciale dans le processus de traitement de l'eau. La floculation favorise le contact entre les particules colloïdales déstabilisées et leur agglomération. Lors de cette phase, un floculant, souvent un polymère, est injecté dans l'eau. Ce floculant joue un rôle de liant, agissant comme une colle qui facilite l'adhésion des particules colloïdales entre elles et augmente leur masse.

Les polymères utilisés comme floculants possèdent de longues chaînes moléculaires qui créent des ponts entre les particules, renforçant les liaisons interparticulaires et formant des agrégats plus volumineux et plus denses. Pour optimiser ce processus,

un agitateur à faible vitesse est employé. Cet agitateur assure une agitation douce et contrôlée, essentielle pour éviter la rupture des floccs formés tout en permettant leur croissance progressive.

La vitesse lente de l'agitation permet aux floccs de se développer sans être désintégrés par une agitation excessive. En effet, une agitation trop intense pourrait briser les floccs naissants, réduisant ainsi l'efficacité de la floculation. Une agitation modérée permet au contraire aux particules de s'assembler progressivement en floccs de plus en plus gros.

Ainsi, la floculation, en utilisant un flocculant approprié et une agitation adéquate, joue un rôle déterminant dans l'agglomération des particules colloïdales, formant des floccs volumineux et stables, et constitue une étape essentielle pour améliorer l'efficacité globale du processus de traitement de l'eau.



FIGURE 3.10 – Bassin de floculation station corso

- **Décantation** : La décantation lamellaire joue un rôle essentiel dans le processus de dessalement, en particulier après les étapes de coagulation et de floculation. Cette opération permet de clarifier l'eau de mer en séparant les particules insolubles, ce qui aboutit à un liquide plus propre, avec moins de Matières en Suspension (MES), et des boues concentrées.

Dans ce processus, les particules en suspension, après avoir été agglomérées par les coagulants et flocculants, tombent lentement vers le fond du décanteur par gravité. Elles forment alors des boues, qui sont éliminées à l'aide de pompes d'extraction. Parallèlement, l'eau clarifiée s'écoule vers le haut et est récupérée à la surface via des déversoirs et des canaux, prête pour les étapes de filtration et d'osmose inverse. L'innovation de la décantation lamellaire réside dans l'utilisation de plaques inclinées, ou lamelles, qui augmentent la surface de décantation sans agrandir l'in-

frastructure. Ces lamelles créent des flux parallèles, réduisant la distance que les particules doivent parcourir pour se déposer, accélérant ainsi le processus de sédimentation et améliorant l'efficacité de la séparation.

Cette technique optimise la préparation de l'eau de mer pour le dessalement, augmentant la clarté de l'eau avant son traitement ultérieur. En multipliant les surfaces de contact, elle permet une séparation plus rapide et efficace des particules, réduisant le volume de boues et améliorant la qualité de l'eau clarifiée. Ceci est particulièrement avantageux dans les installations de dessalement où l'espace est limité, car cela augmente la capacité de traitement sans nécessiter l'agrandissement de l'infrastructure existante. La simplicité de maintenance et d'exploitation des décanteurs lamellaires en fait une solution pratique et économique pour le prétraitement de l'eau de mer.



FIGURE 3.11 – Decanteur station corso

3.8 filtre à sable :

L'objectif de cet ouvrage est de séparer les particules en suspension par passage à travers plusieurs couches filtrantes susceptibles de les retenir. En traitement des eaux, la filtration granulaire sur un lit de sable est le procédé le plus répandu. Elle consiste à faire circuler l'écoulement, soit par gravité, soit sous pression (pressurisé), à travers un lit de sable. L'eau brute, préalablement déstabilisée par les processus de coagulation et de floculation, est ensuite décantée, permettant ainsi aux particules en suspension de se déposer dans les couches filtrantes. Cette opération joue un rôle crucial dans l'élimination des bactéries, de la couleur, de la turbidité ainsi que de certains goûts et odeurs présents dans l'eau. La filtration sur sable est particulièrement efficace grâce à la structure granulaire du

lit filtrant, qui offre une surface étendue pour la capture des particules. Dans ce contexte, il est essentiel de distinguer deux types principaux de filtration sur sable : le filtre à sable gravitaire et le filtre à sable pressurisé, chacun ayant des applications spécifiques et des caractéristiques opérationnelles distinctes.

• **Caractéristiques des matériaux filtrants :**

Les principaux matériaux filtrants utilisés sont le sable de quartz, le charbon filtrant sous forme d'anhracite, la pouzzolane et le sable grenat (voir Tableau 3.2). Ces matériaux diffèrent par leur densité du matériau ρ_g , M ainsi que par la forme de leurs grains. La densité apparente ρ_b dans le lit filtrant varie en conséquence. Celle-ci est également déterminée par la distribution granulométrique du matériau concerné. En fonction de la distribution granulométrique sélectionnée pour le lit filtrant, la densité apparente respective est assignée par le fournisseur du matériau.

La porosité du lit filtrant ε est calculée à partir de la densité du matériau ou des grains ρ_g et de la densité apparente ρ_b du matériau filtrant :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_g} \tag{3.1}$$

Elle peut également être calculée en utilisant le volume des vides V_v et le volume total du lit filtrant V_T :

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_T} \tag{3.2}$$

Matériau filtrant	Densité ρ_g (kg/m ³)	Densité ρ_b (kg/m ³)	Dureté (Moh)
Sable de quartz	2550–2650	1400–1600	7.0
Anhracite	1400–1600	700–800	3.0–4.0
Hydroanhracite	1700–1900	450–550	3.0–4.0
Pouzzolane	2300–2500	300–500	5.0–6.0
Grenat	3500–4300	2100–2400	7.0–8.0

TABLE 3.2 – Caractéristiques des matériaux filtrants[9]

• **Performance du filtre :**

- ★ **Élimination des Solides :** L'objectif des filtres de prétraitement pour les installations d'osmose inverse (RO) n'est pas seulement d'éliminer plus de 99 % des solides en suspension dans l'eau source, mais aussi de réduire le contenu des particules de limon beaucoup plus fines de plusieurs ordres de grandeur. Par conséquent, la conception de ces installations est généralement régie par l'indice de densité des sédiments (SDI) cible de l'effluent du filtre plutôt que par la turbidité cible ou les taux d'élimination des pathogènes.

L'efficacité du filtre en termes d'élimination des solides (réduction de la turbidité et des matières en suspension totales) n'est pas directement liée à son efficacité d'élimination du limon et des colloïdes fins (capacité de réduction du SDI). Les matières organiques dissoutes et les coagulants (sels de fer) peuvent être absorbés sur ou dans le tampon de test du filtre SDI, ce qui entraîne des valeurs de SDI accrues. L'expérience à grande échelle de nombreuses installations de filtres de prétraitement à média granulaire indique que les filtres peuvent réduire de manière constante la turbidité de l'eau source à moins de 0,1 NTU, tout en produisant simultanément un effluent avec un SDI dépassant fréquemment 4. Dans de nombreux cas, les filtres à média granulaire dans les usines de dessalement par RO doivent être conçus de manière plus conservatrice que des filtres similaires dans les usines de traitement des eaux de surface conventionnelles, afin de capturer les solides fins, le limon et les matières organiques colloïdales contenues dans l'eau salée source.

★ **Élimination des Matières Organiques :**

Les filtres bimédia gravitaires et sous pression typiques, avec une profondeur de lit filtrant conventionnelle de 1,0 à 1,4 m (3,3 à 5,3 -ft), ont un taux d'élimination des matières organiques relativement faible—de 15 à 20 %. Cependant, ce taux d'élimination augmente de manière significative avec la profondeur et peut atteindre 25 à 35 % pour les filtres ayant une profondeur totale de 2 m (6,6 -ft) ou plus. Si une couche de carbone est installée au sommet du média filtrant (au-dessus de la couche d'anthracite), le taux d'élimination du carbone organique total (COT) du filtre peut être augmenté à 40 à 50 %.

★ **Élimination des Microorganismes :**

Algues :

Le taux d'élimination des algues par les filtres dépend principalement de la taille des algues et de la taille du média filtrant. La plupart des algues de plus de 100 µm sont généralement retenues à la surface du média supérieur (anthracite/pouzzolane). Les observations pratiques indiquent que plus l'usine de dessalement est proche de l'équateur, plus le pourcentage de micro- et pico-algues dans l'eau de mer source est élevé. Ces algues ne sont pas bien éliminées par les médias de sable conventionnels de taille comprise entre 0,4 et 0,6 mm (400 à 600 µm) et nécessitent l'installation d'une troisième couche de média filtrant plus fin. En fonction de la taille des médias et des algues dominantes dans l'eau source, l'élimination des algues peut généralement varier entre 20 % et 90 %.

Bactéries et Virus :

Les filtres de prétraitement pour le dessalement éliminent typiquement 99 %

(réduction de 2-log) des pathogènes, mais peuvent parfois avoir des taux d'élimination plus faibles pour les bactéries marines. Ces bactéries sont généralement plus petites que les pathogènes humains et peuvent passer à travers les filtres.

3.8.1 Types et Configurations de filtres :

★ filtres à Milieu Unique et filtres Bi- et Tri-Média

Les filtres à milieu unique ne sont pas très couramment utilisés pour le prétraitement de l'eau salée en raison de leur capacité limitée à fonctionner sous des conditions variables de l'eau source. Typiquement, ces filtres peuvent être appliqués dans les usines de dessalement avec des prises d'eau souterraines produisant une eau avec une turbidité de < 2 NTU, des matières en suspension totales (TSS) de < 3 mg/L, et un indice de densité des sédiments (SDI) de < 6 . La seule application à grande échelle de filtres à milieu unique (sable de 0,7 mm) se trouve à l'usine de dessalement de Tampa Bay en Floride. La plupart des autres usines dans le monde utilisent des filtres bi-média avec une couche supérieure de pouzzolane ou d'antracite et une couche inférieure de sable. Les filtres tri-média ne sont pas couramment utilisés pour le prétraitement des eaux salines. Typiquement, ces filtres sont adaptés pour capturer le petit plancton et les fines particules de limon qui ne peuvent pas être bien retenus par les deux couches supérieures (antracite et sable). Étant donné que le coût des cellules de filtre augmente avec la profondeur, souvent au lieu d'un seul filtre à gravité tri-média profond, une combinaison d'un filtre à gravité à milieu plus grossier (antracite ou sable) suivi d'un filtre sous pression contenant un milieu plus fin (sable et grenat) est utilisée.

★ filtres à Une et Deux Étapes

La filtration à deux étapes est généralement utilisée lorsque l'eau source contient des niveaux élevés de turbidité (généralement au-dessus de 20 NTU) et de matières organiques (COT > 6 mg/L) pendant de longues périodes (c'est-à-dire, des semaines ou des mois). De telles conditions se produisent dans les zones de prise d'eau des usines de dessalement exposées à des événements prolongés de floraisons algales (qui peuvent parfois durer plusieurs mois) ou situées dans les estuaires de rivières qui sont exposés à des niveaux de turbidité élevés pendant la saison des pluies.

Les systèmes de filtration à deux étapes se composent de filtres grossiers (de première étape) et de filtres fins (de finition) opérant en série. Habituellement, le filtre de première étape est de type milieu unique (par exemple, sable grossier ou antracite) ou bi-média, tandis que le filtre de deuxième étape est configuré

comme un filtre bi-média avec les critères de conception décrits dans la section précédente. Le premier filtre (milieu grossier) élimine typiquement 60 à 80 % de la quantité totale de solides contenus dans l'eau source et est conçu pour retenir tous les gros débris et la plupart de la biomasse algale flottante plus grossière. Le filtre de deuxième étape élimine plus de 99 % des solides restants et des fines particules de limon ainsi que des microalgues contenus dans l'eau source, produisant typiquement une turbidité de l'effluent inférieure à 0,05 NTU.

Les filtres à deux étapes présentent plusieurs avantages. Le processus de filtration à travers les filtres à milieu grossier non seulement élimine les gros particules polluantes mais améliore également la coagulation des particules fines contenues dans l'eau source, ce qui facilite leur élimination dans les filtres de deuxième étape et permet de concevoir les filtres de deuxième étape comme des filtres à lit peu profond plutôt que des filtres à lit profond, et de les faire fonctionner à des taux de charge superficielle plus élevés. Ce bénéfice se traduit par une taille réduite des filtres bi-média et par une quantité totale de coagulant (sel ferrique) nécessaire plus faible pour obtenir la même qualité de l'eau effluente du filtre par rapport aux filtres bi-média à une seule étape.

Deux autres avantages des filtres à deux étapes sont que : (1) ils peuvent gérer de plus grandes fluctuations de la turbidité de l'eau source en raison du plus grand volume total de médias filtrants et de la capacité de rétention des solides ; et (2) lorsque les filtres de deuxième étape sont conçus comme des filtres à lit profond (plutôt que peu profond), ils peuvent atteindre une élimination accrue du COT par biofiltration. Alors que les filtres bi-média à lit profond à une seule étape peuvent typiquement éliminer 20 à 30 % du COT contenu dans l'eau de mer source, les systèmes à deux étapes avec des filtres de deuxième étape à lit profond peuvent atteindre une élimination de 40 à 60 % du COT, principalement grâce à une coagulation accrue des particules fines et à la biofiltration.[9]

3.8.2 Les filtres à gravité et filtres sous pression

En fonction de la force motrice de la filtration de l'eau, les filtres à média granulaire sont classés soit comme filtres à gravité, soit comme filtres sous pression. Les principales différences entre les deux types de filtres sont la hauteur de charge nécessaire pour faire passer l'eau à travers le lit de média, le taux de filtration, et le type de récipient utilisé pour contenir le média filtrant. En raison du coût élevé de la construction de grands récipients sous pression avec des surfaces mouillées appropriées pour la résistance à la corrosion, les filtres sous pression sont généralement utilisés pour les usines de RO de petite et moyenne capacité. Les filtres de prétraite-

ment à gravité sont utilisés pour des projets de dessalement RO de petite et grande envergure.

Les filtres à gravité :

Typiquement, les filtres à gravité sont des structures en béton armé qui fonctionnent avec une chute de pression de l'eau à travers le média comprise entre 1,8 et 3,0 m (6 et 10 -ft). La pression hydrostatique au-dessus du lit filtrant fournit la force nécessaire pour surmonter la perte de charge dans le média. Les filtres à gravité à écoulement descendant à double média à une seule étape sont le type prédominant de technologie de prétraitement par filtration utilisée dans les usines de dessalement ayant une capacité supérieure à 40 000 m³/jour (10,6 mgd).

Certaines des plus grandes usines de dessalement par osmose inverse d'eau de mer (SWRO) en opération dans le monde aujourd'hui sont équipées de filtres à gravité à double média à une seule étape.

Avantages clés des filtres à gravité :

1. **Meilleure élimination des matériaux algaux de l'eau de mer :** L'eau de mer contient toujours une quantité mesurable d'algues, dont la concentration augmente généralement plusieurs fois pendant l'été et peut augmenter jusqu'à 10 fois pendant les périodes de prolifération algale. Certaines espèces d'algues présentes lors des événements de marée rouge ont des cellules relativement faciles à briser sous une pression aussi faible que 0,3 à 0,6 bar (4 à 9 lb/in²) [9] . Lorsque les cellules d'algues se brisent, elles libèrent du cytoplasme dans l'eau source, contenant une forte teneur en polysaccharides facilement biodégradables, entraînant un encrassement biologique accéléré des membranes RO.
2. **Longévité supérieure de la structure du filtre :** Les filtres à gravité sont généralement des structures en béton avec une durée de vie utile de 50 à 100 ans, tandis que les filtres sous pression sont des structures en acier avec une durée de vie inférieure à 25 ans. La surface interne des filtres sous pression dans les usines de dessalement est généralement revêtue de caoutchouc ou d'époxy, nécessitant une inspection et un remplacement tous les 5 à 10 ans.
3. **Consommation énergétique réduite :** Les filtres sous pression fonctionnant à des pressions d'alimentation beaucoup plus élevées que les filtres à gravité, la consommation d'énergie pour la filtration sous pression est proportionnellement plus élevée.
4. **Capacité de rétention de solides supérieure et meilleure gestion des pics de turbidité :** Les filtres à gravité ont un volume de média filtrant et un

temps de rétention environ deux à trois fois supérieurs à ceux des filtres sous pression pour la même capacité de production d'eau, permettant de retenir proportionnellement plus de solides.

5. **Inspection et maintenance simplifiées** : Les filtres à gravité sont typiquement couverts de panneaux en plastique léger protégeant les cellules filtrantes de la lumière directe du soleil, ou sont installés dans des bâtiments. Les couvertures peuvent être facilement retirées, permettant une inspection visuelle des cellules filtrantes pour détecter les irrégularités. Les filtres sous pression sont complètement fermés et très difficiles à inspecter.
6. **Adaptation plus facile au prétraitement par membrane** : À mesure que la technologie de prétraitement par membrane évolue, il sera très avantageux de modifier les filtres à média granulaire conventionnels existants en filtres de prétraitement à membrane submersible. Cette mise à niveau sera possible tant que les cellules de filtre à gravité sont conçues avec une profondeur et une configuration adéquates pour accueillir des membranes d'ultrafiltration et de microfiltration submersibles.



FIGURE 3.12 – filtres à gravité à un seul étage à l'usine de dessalement SWRO de Gold Coast, Australie.[9]

3.8.3 Les filtres sous pression

Les filtres sous pression possèdent une configuration de lit filtrant similaire à celle des filtres à gravité, à la différence que le média filtrant est contenu dans une cuve en acier sous pression. Ils sont principalement utilisés dans les petites et moyennes usines de dessalement d'eau de mer, généralement avec une capacité de production de moins de 20 000 m³/jour (5,3 mgd).

Dans la plupart des cas, pour une bonne qualité de l'eau source (SDI < 5 et turbidité inférieure à 5 NTU), les filtres sous pression sont conçus comme des unités à un seul étage avec deux types de médias (anthracite et sable). Certaines usines avec une qualité de l'eau relativement médiocre utilisent des systèmes de filtration sous pression à deux étages. Les filtres sous pression sont disponibles en deux configurations de cuve : verticale et horizontale.

Les filtres sous pression verticaux (Fig. 3.13) sont habituellement utilisés dans les petites usines ; les cuves individuelles ont un diamètre maximum de 3 m. Les filtres sous pression horizontaux (Fig. 3.14) sont plus populaires pour les installations de taille moyenne et grande. Les filtres horizontaux permettent une plus grande surface de filtration par cuve que les unités verticales. Cependant, les cuves verticales peuvent généralement être conçues avec des médias filtrants plus profonds, si des filtres profonds sont nécessaires pour gérer les pics de turbidité de l'eau source.

Comparés aux filtres à média gravitaire, qui fonctionnent avec un niveau d'eau maximal sur le lit filtrant de jusqu'à 2,5 m (8,2 -ft), les filtres sous pression fonctionnent généralement à une pression d'alimentation équivalente à 15 à 30 m (49 à 98 -ft) de colonne d'eau. L'ampleur de la pression d'alimentation est souvent déterminée par les exigences de pression de succion des pompes d'alimentation haute pression pour le système RO en aval.

Un avantage clé de l'utilisation des filtres sous pression est qu'ils peuvent éviter la nécessité de pompage intermittent de l'eau source prétraitée. Un système RO typique avec des filtres de prétraitement à gravité nécessite l'installation de pompes de transfert d'effluent filtré pour transporter le filtrat du puits d'effluent du filtre aux pompes d'alimentation haute pression RO. L'utilisation de filtres sous pression peut éliminer le besoin de telles pompes de transfert intermédiaires d'effluent filtré, car le filtrat est déjà pressurisé par les pompes d'admission, et les filtres de prétraitement ne brisent pas la ligne de gradient hydraulique.



FIGURE 3.13 – filtres sous pression verticaux
[9]

3.8.4 Principaux avantages

Les principaux avantages des filtres sous pression sont discutés ci-dessous .

1. **Coûts de construction plus bas** : Les filtres sous pression sont des structures en acier préfabriquées ; leurs coûts de production par unité de capacité de filtration sont inférieurs à ceux des filtres à gravité en béton. Étant donné que les filtres sous pression sont conçus avec des taux de charge surfacique environ 2 à 3 fois supérieurs à ceux des filtres à gravité—25 à 45 m³/m²·h (10 à 18 gal/min·ft²) contre 8 à 15 m³/m²·h (3 à 6 gal/min·ft²)—leur volume et leur taille sont plus petits, et ils sont donc généralement moins coûteux à construire et à installer.[9]
2. **Empreinte au sol plus petite** : En raison de leur volume et de leur surface de filtration plus réduits, les filtres sous pression occupent une empreinte au sol plus petite. Si le site disponible a une empreinte limitée, c'est un facteur important à considérer lors de la sélection de la technologie de filtration à média granulaire.
3. **Installation plus simple** : Comme les cuves des filtres sous pression sont préfabriquées, leur temps d'installation est environ 20 à 30 % plus court que celui des filtres à gravité avec structures en béton.
4. **Aucun effet de la lumière solaire sur la croissance des algues dans les déversoirs des filtres** : Les filtres sous pression sont entièrement fermés, la lumière



FIGURE 3.14 – filtres sous pression horizontaux

solaires ne peuvent donc pas atteindre les déversoirs des filtres, le système de distribution et les médias pour induire la croissance des algues, ce qui aurait un impact négatif sur les performances des filtres. Les filtres à gravité (surtout s'ils ne sont pas situés dans un bâtiment ou couverts de panneaux non translucides) peuvent développer des algues sur tous les composants mouillés exposés à la lumière directe du soleil.

3.9 Réservoir d'eau filtrée

Un **réservoir d'eau filtrée** est une structure de stockage essentielle dans le processus de traitement de l'eau, conçue pour contenir l'eau qui a été préalablement traitée et filtrée afin d'éliminer les impuretés, les contaminants et les particules en suspension. Ce réservoir joue un rôle crucial dans la distribution d'eau potable en assurant que l'eau filtrée est disponible pour les étapes suivantes du traitement et pour la distribution finale.

3.9.1 Fonction principale

La principale fonction du réservoir d'eau filtrée est de stocker l'eau qui a passé à travers les différentes étapes de filtration et de prétraitement. Cela garantit une disponibilité continue d'eau propre et prête pour les traitements ultérieurs, tels que la désinfection et l'ajustement des niveaux de minéraux, avant d'être distribuée aux consommateurs.

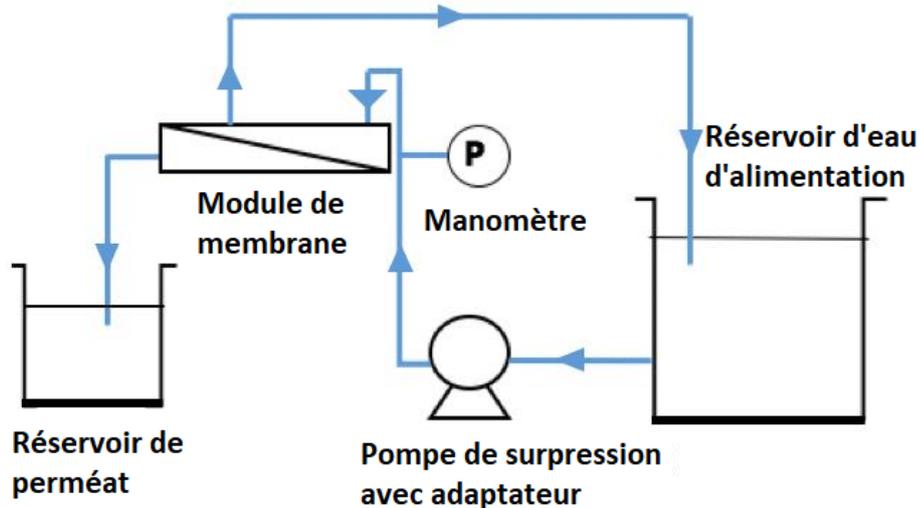


FIGURE 3.15 – Schéma d'un Réservoir d'Eau filtrée

3.9.2 Conception et construction

La conception d'un réservoir d'eau filtrée varie en fonction des besoins spécifiques de l'installation de traitement de l'eau et des conditions locales. Les matériaux couramment utilisés pour la construction incluent le béton armé et l'acier, choisis pour leur durabilité, leur résistance à la corrosion et leur capacité à maintenir une qualité de l'eau optimale. Les réservoirs peuvent être construits sous forme de structures souterraines ou aériennes, en fonction des contraintes d'espace et des exigences opérationnelles.

3.9.3 Maintien de la qualité de l'eau

Pour assurer que la qualité de l'eau reste élevée, le réservoir d'eau filtrée est conçu pour minimiser les risques de contamination secondaire. Cela inclut des mesures telles que la protection contre les infiltrations de contaminants extérieurs, le contrôle de la température pour éviter la prolifération microbienne, et l'utilisation de couvercles hermétiques ou de structures couvertes pour empêcher la lumière solaire directe, ce qui pourrait favoriser la croissance d'algues et d'autres microorganismes.

3.9.4 Capacité de stockage et gestion de la demande

La capacité de stockage d'un réservoir d'eau filtrée est déterminée par les besoins de la population desservie et les variations de la demande en eau. Un dimensionnement adéquat permet de répondre aux pics de consommation et d'assurer une réserve suffisante en cas d'interruptions temporaires du processus de traitement. La gestion efficace du réservoir implique également le maintien d'un niveau d'eau constant pour garantir une pression stable dans le réseau de distribution.



FIGURE 3.16 – réservoir d'eau filtrée

3.9.5 Intégration avec le système de traitement avancé

Le réservoir d'eau filtrée est intégré au système global de traitement de l'eau, jouant un rôle intermédiaire entre les étapes de prétraitement/filtration et les étapes finales de traitement avancé, comme l'osmose inverse ou la désinfection par UV. Cette intégration permet une transition fluide de l'eau filtrée vers ces processus, assurant ainsi une continuité dans la production d'eau potable de haute qualité.

3.9.6 Maintenance et surveillance

Pour assurer un fonctionnement optimal et prolonger la durée de vie du réservoir d'eau filtrée, des programmes de maintenance régulière et de surveillance sont essentiels. Cela inclut des inspections périodiques pour détecter et réparer les fissures ou les signes de corrosion, le nettoyage des sédiments accumulés au fond du réservoir, et la surveillance continue des paramètres de qualité de l'eau. Des systèmes de télémétrie peuvent être utilisés pour surveiller en temps réel les niveaux d'eau, la température et d'autres variables critiques.

En résumé, le réservoir d'eau filtrée est un élément central du système de traitement de l'eau, assurant non seulement le stockage temporaire de l'eau propre mais aussi sa protection et sa qualité avant qu'elle ne soit soumise

3.10 Bâtiment d'Osmose-Inverse

La technologie de l'osmose inverse (RO) est l'une des méthodes les plus courantes pour le dessalement de l'eau de mer. Ce procédé utilise des membranes semi-perméables pour séparer le sel de l'eau de mer, produisant ainsi une eau douce (eau distillée).

3.10.1 Les filtres à cartouche

Les filtres à cartouche jouent un rôle essentiel dans les systèmes d'osmose inverse en offrant une première étape de filtration qui protège les membranes d'osmose inverse et prolonge leur durée de vie.

Fonctionnement des filtres à cartouche

Les filtres à cartouche sont généralement placés en amont des membranes d'osmose inverse. Ils sont conçus pour éliminer les particules en suspension, les sédiments, les oxydes métalliques et d'autres impuretés grossières présentes dans l'eau de mer. Ces filtres assurent une filtration mécanique en retenant les particules plus grandes que la taille des pores de la cartouche.

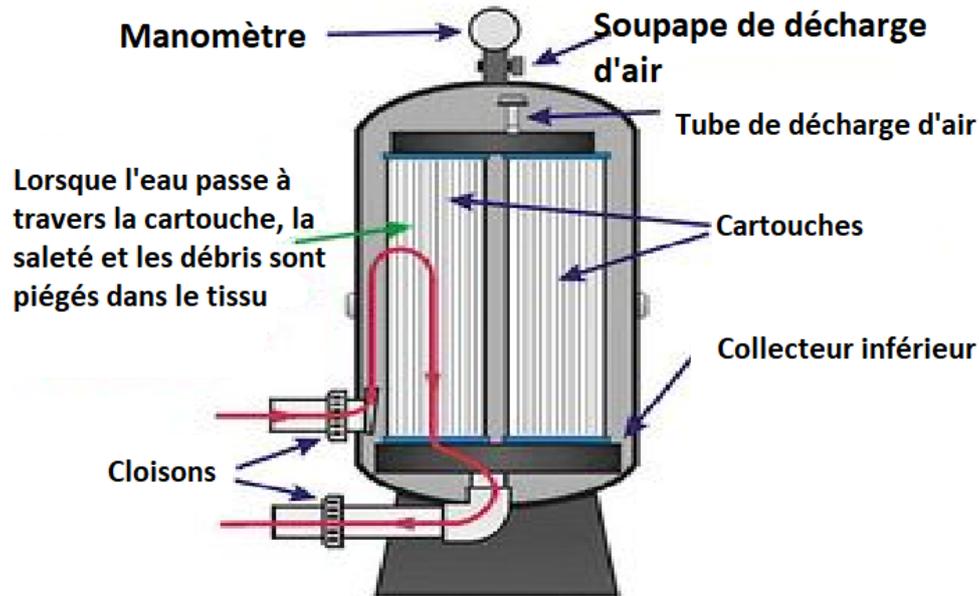


FIGURE 3.17 – Schéma de fonctionnement d'un filtre à cartouche dans un système de filtration d'eau.

Types de filtres à cartouche

Il existe plusieurs types de filtres à cartouche, chacun étant conçu pour des applications spécifiques et des niveaux de filtration différents :

- **filtres à sédiments** : Utilisés pour éliminer les particules grossières et les sédiments. Ils sont souvent faits de polyester, de cellulose ou de polypropylène.
- **filtres à charbon actif** : Utilisés pour éliminer les composés organiques, les produits chimiques et les mauvaises odeurs. Ils sont fabriqués à partir de charbon actif granulaire ou en bloc.
- **filtres à microfibres** : Utilisés pour une filtration plus fine, capable de retenir des particules de très petite taille.

avantages des filtres à cartouche

Les principaux avantages de l'utilisation de filtres à cartouche dans les systèmes d'osmose inverse incluent :

- **Protection des Membranes** : En éliminant les impuretés grossières, les filtres à cartouche protègent les membranes d'osmose inverse contre les obstructions et les dommages.
- **Amélioration de la qualité de l'Eau** : Ces filtres améliorent la qualité globale de l'eau entrant dans le système, assurant ainsi une filtration plus efficace.

- **Facilité d'Entretien** : Les cartouches filtrantes sont faciles à remplacer et à entretenir, réduisant ainsi les coûts opérationnels et les temps d'arrêt.

3.10.2 Fonctionnement de l'Osmose Inverse

L'osmose inverse fonctionne sur la base de plusieurs principes physiques et techniques :

La pression hydraulique

L'eau de mer est forcée à travers des membranes semi-perméables sous une pression hydraulique pouvant atteindre 60 bars. Cette pression est nécessaire pour surmonter la pression osmotique naturelle de l'eau de mer. Les membranes utilisées dans ce processus permettent uniquement le passage des molécules d'eau tout en bloquant les sels dissous et les impuretés.

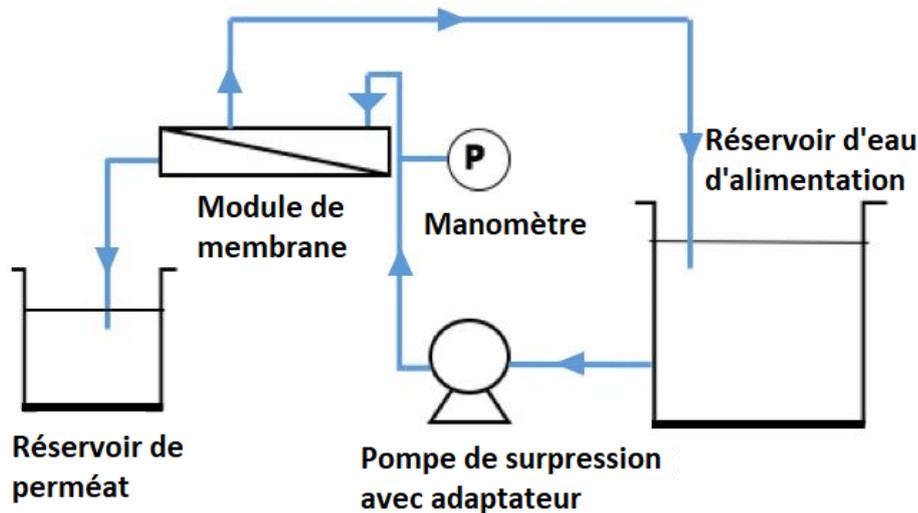


FIGURE 3.18 – Schéma de principe du système de filtration par osmose inverse montrant la séparation des molécules d'eau et des impuretés sous pression.

Élimination des impuretés

Les membranes d'osmose inverse sont conçues pour séparer les molécules d'eau des impuretés présentes dans l'eau de mer. Le processus de filtration commence lorsque l'eau de mer est forcée à travers une membrane semi-perméable sous haute pression. Cette membrane permet uniquement le passage des molécules d'eau, bloquant les sels dissous, les bactéries, les virus, et autres contaminants.

Comme illustré dans la Figure 3.19, l'eau de mer pénètre dans la membrane, où elle est divisée en deux flux : l'eau douce qui traverse la membrane et la saumure concentrée qui est rejetée. Les grilles d'espacement maintiennent la structure de la membrane, permettant une distribution uniforme de l'eau et optimisant ainsi le processus de filtration.

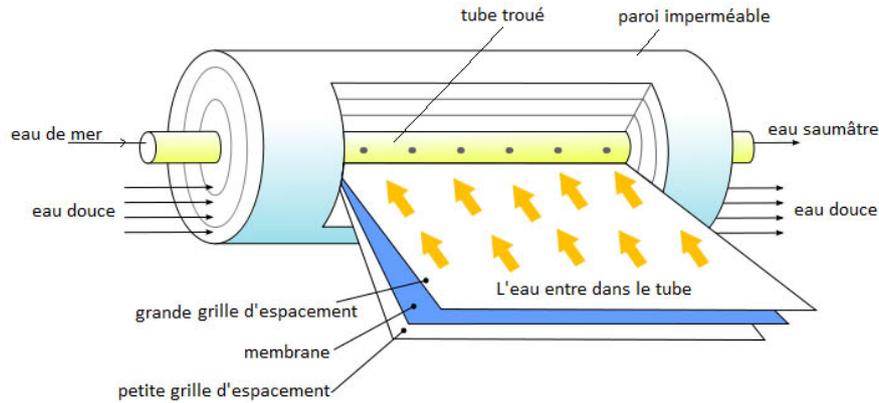


FIGURE 3.19 – Mécanisme de la membrane d'osmose inverse montrant la séparation des molécules d'eau des impuretés.

Ce mécanisme garantit que l'eau produite est de haute qualité et convient à la consommation humaine ou à d'autres usages, en retenant efficacement les contaminants et en produisant une eau douce purifiée.

Concentration de saumure

Les impuretés retenues par les membranes forment une solution concentrée appelée saumure. Cette saumure doit être évacuée et gérée correctement pour éviter tout impact environnemental négatif. La gestion de la saumure est un aspect crucial de l'opération des systèmes d'osmose inverse, nécessitant des solutions de rejet en mer ou des traitements supplémentaires pour minimiser son volume et sa concentration en contaminants.

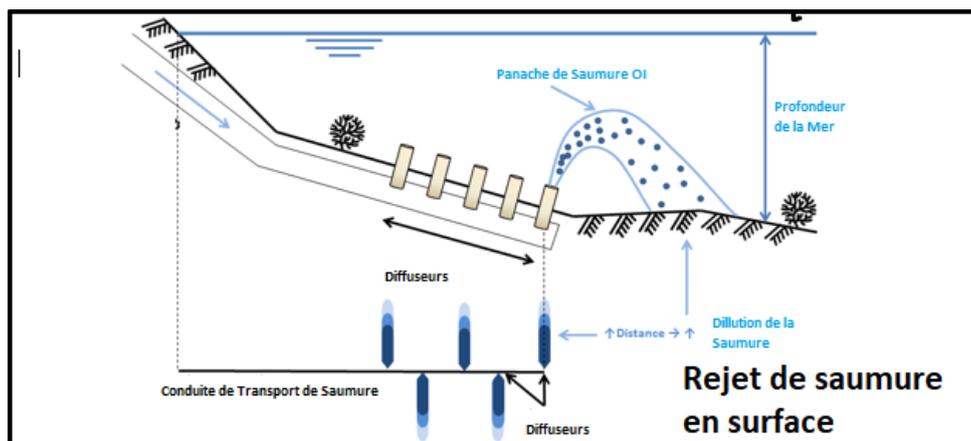


FIGURE 3.20 – Gestion de la saumure dans les systèmes d'osmose inverse.

3.10.3 Efficacité et avantages

L'osmose inverse est très efficace pour produire de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Ce procédé permet de réduire la teneur en sel de l'eau de mer de manière significative, la rendant ainsi potable et utilisable pour divers besoins industriels et domestiques.

En résumé, le bâtiment d'osmose inverse joue un rôle central dans les installations de dessalement, assurant la production continue d'eau douce de haute qualité grâce à des processus physiques et chimiques avancés.

3.11 Bâtiment de reminéralisations

Après le processus d'osmose inverse (OI), l'eau perd tous ses minéraux essentiels. La reminéralisation vise à réintroduire des sels minéraux dans l'eau en améliorant ainsi sa qualité et sa composition.

3.11.1 Nécessité de la reminéralisation

La reminéralisation est nécessaire pour :

- **Répondre aux Normes de qualité** : Les normes de qualité de l'eau potable exigent une certaine concentration de minéraux pour assurer la sécurité et la santé des consommateurs.
- **Adaptation à la consommation Humaine** : L'eau reminéralisée est meilleure pour la consommation humaine car elle contient des minéraux essentiels comme le calcium et le magnésium, qui sont bénéfiques pour la santé.

3.11.2 Processus de reminéralisation

Le processus de reminéralisation réintroduit les sels minéraux dans l'eau en utilisant principalement des lits de calcite (CaCO_3).

Utilisation des Lits de Calcite

- Les lits de calcite à flux ascendant et à hauteur constante garantissent une qualité constante de l'eau de sortie.
- Les contacteurs de CaCO_3 conventionnels, à débit descendant ou ascendant, sont utilisés pour la recarbonisation de l'eau dessalée.
- Le dosage chimique ajuste la dureté et l'alcalinité de l'eau en dissolvant de la calcite dans l'eau.

Transformation de la Calcite

La calcite (CaCO_3) n'étant pas soluble dans l'eau, il est nécessaire de la transformer en bicarbonate de calcium ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), une forme soluble, par l'ajout de dioxyde de carbone (CO_2).



Ajustement du pH

L'ajustement du pH se fait par injection de gaz CO_2 :

- Le flux porteur de CO_2 est mélangé avec le flux d'alimentation des cellules de calcite.
- Après le mélange, une dose de soude caustique (NaOH) est ajoutée pour éliminer le CO_2 résiduel de l'eau et ajuster le Langelier Saturation Index (LSI) pour qu'il soit dans la plage des spécifications.

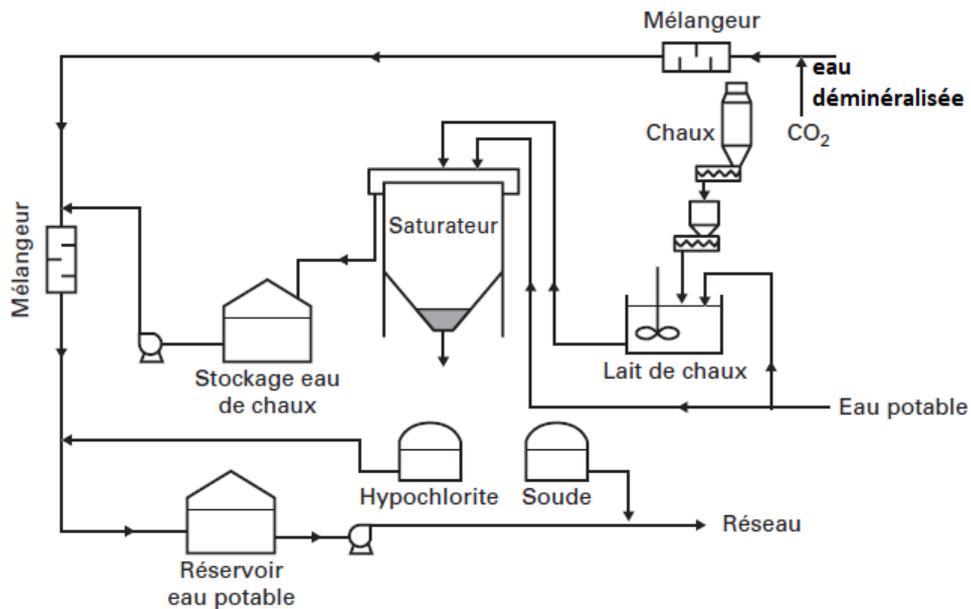


FIGURE 3.21 – Processus de reminéralisation

3.11.3 Stockage de l'Eau Reminéralisée

Une fois reminéralisée, l'eau s'écoule vers les réservoirs de stockage où elle est maintenue pour une distribution ultérieure.



FIGURE 3.22 – Réservoirs de Stockage pour l'Eau Reminéralisée

3.12 Conclusion

En conclusion, l'osmose inverse (RO) joue un rôle crucial dans la gestion et la purification de l'eau. La compréhension de la composition de l'eau de mer est essentielle pour optimiser les processus de dessalement. L'osmose inverse permet de filtrer les contaminants et les sels dissous, offrant ainsi une source d'eau potable fiable. Toutefois, cette technologie présente des défis et des problèmes, notamment l'encrassement des membranes, la consommation énergétique élevée et les coûts associés.

La technologie à membrane continue d'évoluer, et des améliorations constantes sont nécessaires pour surmonter ces obstacles. Les installations et les équipements doivent être soigneusement conçus et entretenus pour assurer un fonctionnement optimal. En somme, bien que l'osmose inverse soit une solution prometteuse pour le dessalement de l'eau de mer, des efforts continus en recherche et développement sont indispensables pour rendre cette technologie plus efficace et accessible à grande échelle.

Chapitre 4

calcul hydraulique pour le cas des filtres à sable Gravitaire

4.1 Introduction

Le dimensionnement des filtres à sable gravitaire implique plusieurs étapes critiques pour assurer un fonctionnement optimal et une efficacité maximale. Ce chapitre détaille le processus de conception, les paramètres utilisés, et les calculs effectués pour dimensionner correctement le système de filtration.

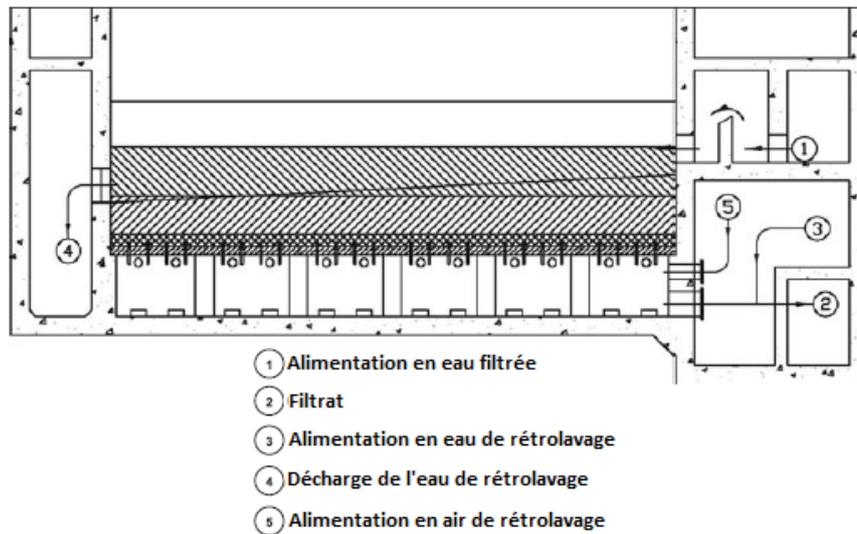


FIGURE 4.1 – Schéma de filtre à gravité ouvert

Paramètres Généraux :

Paramètre	Valeur	Unité
Cas Débit Max		
Q _p (Débit)	330000	m ³ /j
Q entre par linge	4.243827	m ³ /s
Longueur du conduite	820	m

Cas Débit Nominal		
Q _p (Débit)	306000	m ³ /j
Q entre	3.935185	m ³ /s
Longueur du conduite	820	m

La tour de prise

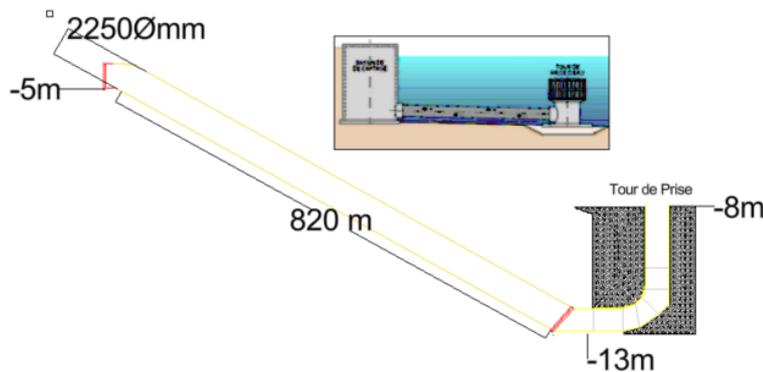


FIGURE 4.2 – plan de la tour de prise

4.2 Dimensionnement des collecteurs pour la Prise d'Eau

Afin de garantir que la station de dessalement puisse fonctionner à pleine capacité même en cas de panne de l'une des conduites d'entrée, il est crucial de concevoir les collecteurs de manière à ce qu'ils puissent traiter le débit maximal avec une seule conduite en service.

calcul des Diamètres Min et Max

Pour déterminer le diamètre optimal des conduites, nous devons calculer les valeurs des diamètres minimaux et maximaux pour les quatre cas suivants :

1. Formulas :

$$S_{\min} = \frac{Q_{\text{par conduite}}}{v_{\max}} \quad (4.1)$$

$$S_{\max} = \frac{Q_{\text{par conduite}}}{v_{\min}} \quad (4.2)$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\min}}{\pi}} \quad (4.3)$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\max}}{\pi}} \quad (4.4)$$

2. Deux conduites avec un débit de

$$Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

— calculs :

$$S_{\min} = \frac{4.24 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 2.122 \text{ m}^2$$

$$S_{\max} = \frac{4.24 \text{ m}^3/\text{s}}{1} = 4.24 \text{ m}^2$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.122 \text{ m}^2}{\pi}} = 1643.69 \text{ mm}$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4.24 \text{ m}^2}{\pi}} = 2324.52 \text{ mm}$$

3. Deux conduites avec un débit de

$$Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

— calculs :

$$S_{\min} = \frac{3.94 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 1.97 \text{ m}^2$$

$$S_{\max} = \frac{3.94 \text{ m}^3/\text{s}}{1} = 3.94 \text{ m}^2$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1.97 \text{ m}^2}{\pi}} = 1582.79 \text{ mm}$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.94 \text{ m}^2}{\pi}} = 2238.40 \text{ mm}$$

4. Une seule conduite avec un débit de

$$Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

— calculs :

$$S_{\min} = \frac{8.49 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 4.245 \text{ m}^2$$

$$S_{\max} = \frac{8.49 \text{ m}^3/\text{s}}{1} = 8.49 \text{ m}^2$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4.245 \text{ m}^2}{\pi}} = 2324.52 \text{ mm}$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8.49 \text{ m}^2}{\pi}} = 3287.37 \text{ mm}$$

5. Une seule conduite avec un débit de

$$Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

— calculs :

$$S_{\min} = \frac{7.87 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 3.935 \text{ m}^2$$

$$S_{\max} = \frac{7.87 \text{ m}^3/\text{s}}{1} = 7.87 \text{ m}^2$$

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.935 \text{ m}^2}{\pi}} = 2238.40 \text{ mm}$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7.87 \text{ m}^2}{\pi}} = 3165.58 \text{ mm}$$

Tableau des Diamètres calculés

Voici les Valeurs calculées des diamètres D_{\min} et D_{\max} pour chaque cas :

Cas	Description	D_{\min} (mm)	D_{\max} (mm)
1	Deux conduites, $Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$	1643.69	2324.52
2	Deux conduites, $Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$	1582.79	2238.40
3	Une seule conduite, $Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$	2324.52	3287.37
4	Une seule conduite, $Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$	2238.40	3165.58

4.2.1 Choix du Diamètre Optimal

Le choix final du diamètre des conduites dépendra de la disponibilité des diamètres sur le marché. Voici un tableau des produits disponibles pour les différents diamètres de conduites :

TABLE 4.2 – tableau des diametres des conduites en polyéthylène (PE)

DN (Dext)	Épaisseurs	Di	Épaisseurs	Di
315	9.7	295.6	12.1	290.8
355	10.9	333.2	13.7	327.6
400	12.3	374.7	15.3	369.4
450	13.9	421.8	17.2	416.0
500	15.3	469.4	18.9	463.2
560	17.2	524.6	21.2	517.6
630	19.3	590.2	23.9	582.2
710	21.8	656.8	27.0	647.6
800	24.5	733.0	30.3	722.6
900	27.6	825.0	34.1	813.2
1000	30.6	917.8	37.8	904.4
1200	36.7	1102.6	45.9	1086.6
1400	43.9	1286.2	54.9	1268.2
1600	49.0	1477.6	61.2	1457.6
1800	55.0	1668.0	68.8	1646.4
2000	61.2	1857.6	76.4	1834.8
2250	70.1	2110.0	86.0	2078.0
2500	77.7	2344.4	95.6	2308.8

Nous sélectionnerons le diamètre qui satisfait le mieux les exigences techniques et qui est disponible sur le marché. Le diamètre $D_n = 2250$ mm et epaisseur de $e = 86$ mm est sélectionné comme diamètre optimal qui satisfait toutes les conditions des quatre cas mentionnés.

4.2.2 Section des conduites

1. Diamètre intérieur $D_n = 2078$ mm
2. calcul de la section $S = 3.39$ m²

4.2.3 Vérification des vitesses

Nous calculons maintenant la vitesse de l'eau dans chaque cas pour assurer qu'elle respecte les limites spécifiées :

Formule pour la vitesse :

$$v = \frac{Q}{S} \tag{4.5}$$

1. **Cas 1 : Deux conduites,**

$$Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$, Q_{\text{par conduite}} = 4.24 \text{ m}^3/\text{s}$$

— calcul de la vitesse :

$$v = \frac{4.24 \text{ m}^3/\text{s}}{3.39 \text{ m}^2} = 1.251 \text{ m/s}$$

— Vérification de la vitesse : Dans les limites ($1 \text{ m/s} < 1.251 \text{ m/s} < 2.5 \text{ m/s}$)

2. **Cas 2 : Deux conduites,**

$$Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$, Q_{\text{par conduite}} = 3.94 \text{ m}^3/\text{s}$$

— calcul de la vitesse :

$$v = \frac{3.94 \text{ m}^3/\text{s}}{3.39 \text{ m}^2} = 1.160 \text{ m/s}$$

— Vérification de la vitesse : Dans les limites ($1 \text{ m/s} < 1.160 \text{ m/s} < 2.5 \text{ m/s}$)

3. **Cas 3 : Une seule conduite,**

$$Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$, Q_{\text{par conduite}} = 8.49 \text{ m}^3/\text{s}$$

— calcul de la vitesse :

$$v = \frac{8.49 \text{ m}^3/\text{s}}{3.39 \text{ m}^2} = 2.503 \text{ m/s}$$

— Vérification de la vitesse : Légèrement au-dessus de la limite ($2.503 \text{ m/s} > 2.5 \text{ m/s}$), mais acceptable dans des conditions rares et temporaires. (Lavage de la conduite).

4. **Cas 4 : Une seule conduite,**

$$Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$, Q_{\text{par conduite}} = 7.87 \text{ m}^3/\text{s}$$

— Utilisation de la formule pour la vitesse :

$$v = \frac{Q_{\text{par conduite}}}{S}$$

— calcul de la vitesse :

$$v = \frac{7.87 \text{ m}^3/\text{s}}{3.39 \text{ m}^2} = 2.321 \text{ m/s}$$

— Vérification de la vitesse : Dans les limites ($1 \text{ m/s} < 2.321 \text{ m/s} < 2.5 \text{ m/s}$)

Tableau des vitesses calculées

Voici un tableau récapitulatif des vitesses calculées pour chaque cas :

Cas	Description	Vitesse v (m/s)
1	Deux conduites, $Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$	1.251
2	Deux conduites, $Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$	1.160
3	Une seule conduite, $Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$	2.503
4	Une seule conduite, $Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$	2.321

Ces résultats montrent que les vitesses de l'eau dans tous les cas sont généralement conformes aux spécifications, à l'exception du cas 3 où la vitesse est légèrement supérieure à la limite maximale. Cependant, cette situation est rare et de courte durée, donc elle ne devrait pas causer de dommages significatifs aux conduites, ce qui sera confirmé après des études techniques et économiques approfondies.

Formules utilisées pour le calcul de la perte de charge

1. Nombre de Reynolds (Re) :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (4.6)$$

Où :

- V est la vitesse d'écoulement du fluide.
- D est le diamètre du tuyau.
- ν est la viscosité cinématique du fluide.

Les régimes d'écoulement sont déterminés par le nombre de Reynolds (Re) :

- Régime laminaire : $Re < 2000$
- Régime de transition : $2000 \leq Re \leq 4000$
- Régime turbulent : $Re > 4000$

Pour notre cas spécifique, puisque le nombre de Reynolds sera toujours supérieur à 4000, tous nos cas d'écoulement seront en régime turbulent.

2. **Facteur de Frottement ($\lambda_{\text{réel}}$)** : L'équation de Darcy-Weisbach pour calculer le facteur de frottement :

$$\lambda_{\text{réel}} = \frac{0.0015}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda_{\text{réel}}}} \quad (4.7)$$

Cette équation est résolue de manière itérative pour trouver $\lambda_{\text{réel}}$.

3. **Perte de charge ($h_{\text{réel}}$)** :

$$h_{\text{réel}} = \lambda_{\text{réel}} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4.8)$$

Où :

- L est la longueur du tuyau.
- g est l'accélération due à la gravité.

4.2.4 calcul de perte de charge

Rugosité du Tuyau

La rugosité du tuyau choisie est = 0.0015 mm.

- **Cas de Deux Conduites, Débit**

$$Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

- **calcul du Reynolds (Re)** :

$$Re = \frac{1.251344013 \times 2078 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 2600292.859$$

— calcul du facteur de frottement réel ($\lambda_{\text{réel}}$) :

$$\lambda_{\text{réel}} = \frac{0.0015}{3.7 \times 2078 \times 10^{-3}} + \frac{2.51}{2600292.859 \sqrt{\lambda_{\text{réel}}}} = 0.009968306$$

— calcul de la perte de charge réelle ($h_{\text{réel}}$) :

$$h_{\text{réel}} = 0.009968306 \cdot \frac{300}{2078 \times 10^{-3}} \cdot \frac{1.251344013^2}{2 \times 9.81} = 0.313938147 \text{ m}$$

— Cas de deux conduites, débit

$$Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

— calcul du Reynolds (Re) :

$$Re = \frac{1.160337176 \times 2078 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 2411180.651$$

— calcul du facteur de frottement réel ($\lambda_{\text{réel}}$) :

$$\lambda_{\text{réel}} = \frac{0.0015}{3.7 \times 2078 \times 10^{-3}} + \frac{2.51}{2411180.651 \sqrt{\lambda_{\text{réel}}}} = 0.010088283$$

— calcul de la perte de charge réelle ($h_{\text{réel}}$) :

$$h_{\text{réel}} = 0.010088283 \cdot \frac{300}{2078 \times 10^{-3}} \cdot \frac{1.160337176^2}{2 \times 9.81} = 0.273183826 \text{ m}$$

— Cas d'une seule conduite, débit

$$Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

— calcul du Reynolds (Re) :

$$Re = \frac{2.502688026 \times 2078 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 5200585.719$$

— calcul du facteur de frottement réel ($\lambda_{\text{réel}}$) :

$$\lambda_{\text{réel}} = \frac{0.0015}{3.7 \times 2078 \times 10^{-3}} + \frac{2.51}{5200585.719 \sqrt{\lambda_{\text{réel}}}} = 0.008964058$$

— calcul de la perte de charge réelle ($h_{\text{réel}}$) :

$$h_{\text{réel}} = 0.008964058 \cdot \frac{300}{2078 \times 10^{-3}} \cdot \frac{2.502688026^2}{2 \times 9.81} = 1.129242971 \text{ m}$$

— Cas d'une seule conduite, débit

$$Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

— calcul du Reynolds (Re) :

$$Re = \frac{2.320674352 \times 2078 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 4822361.303$$

— calcul du facteur de frottement réel ($\lambda_{\text{réel}}$) :

$$\lambda_{\text{réel}} = \frac{0.0015}{3.7 \times 2078 \times 10^{-3}} + \frac{2.51}{4822361.303 \sqrt{\lambda_{\text{réel}}}} = 0.0090654$$

— calcul de la perte de charge réelle ($h_{\text{réel}}$) :

$$h_{\text{réel}} = 0.0090654 \cdot \frac{300}{2078 \times 10^{-3}} \cdot \frac{2.320674352^2}{2 \times 9.81} = 0.981\,939\,432 \text{ m}$$

4.2.5 Conclusion

Maintenant que nous avons vérifié que la prise d'eau fonctionne correctement à travers l'analyse des pertes de charge dans les différentes configurations de conduites, nous pouvons passer à l'étape suivante : le bassin de captage.

4.3 Dimensionnement de la captage et importance du choix des pompes

Le dimensionnement du système de captage d'eau est crucial pour assurer le bon fonctionnement du filtre à sable gravitaire. En particulier, le choix des pompes est une étape critique car elles doivent fournir une charge suffisante pour que le filtre à sable fonctionne sans problèmes. Nous nous concentrerons ici sur la partie pompage, comprenant l'aspiration et le refoulement.

Le filtre à sable gravitaire nécessite un débit d'eau constant et contrôlé pour filtrer efficacement les impuretés. Pour cela, les pompes doivent être dimensionnées de manière appropriée afin de maintenir une pression suffisante à l'entrée du filtre à sable, assurant ainsi une filtration efficace.

Le dimensionnement des pompes doit prendre en compte plusieurs facteurs :

- **Débit requis** : calculé en fonction de la capacité de traitement du filtre à sable et du débit d'eau nécessaire pour maintenir une filtration efficace.
- **hauteur manométrique totale** : Comprend la hauteur d'aspiration, les pertes de

charge dans les conduites, et la hauteur de refoulement jusqu'au filtre à sable.

- **Caractéristiques des pompes** : Il est essentiel de choisir des pompes adaptées qui peuvent fonctionner efficacement dans les conditions spécifiques du système de captage, notamment en termes de capacité, de pression et de fiabilité.

Dans la section suivante, nous aborderons plus en détail le dimensionnement spécifique des pompes, en mettant l'accent sur les aspects techniques et les considérations pratiques pour garantir une opération efficace du filtre à sable gravitaire.

Formule de la hauteur manométrique totale (HMT)

La formule générale pour calculer la hauteur manométrique totale (HMT) est :

$$\text{HMT} = H_{\text{geo}} + \Delta P + H_{\text{vf}} \quad (4.9)$$

où :

- H_{geo} est la hauteur géométrique totale,
- ΔP est la variation de pression (convertie en hauteur de colonne de liquide),
- H_{vf} est la somme des pertes de charge.

Ce calcul assure que la pompe choisie peut surmonter toutes les résistances du système et fournir un écoulement efficace et fiable du fluide.

TABLE 4.3 – Paramètres généraux

Paramètre	$Q_p=330\ 000\ \text{m}^3/\text{j}$	$Q_p=306\ 000\ \text{m}^3/\text{j}$
Nb pompes	4	4
$Q_{\text{pompe}}\ (\text{m}^3/\text{h})$	3819.44	3541.67
Vitesse asp max	1.5	1.5
Vitesse ref max	3	3

calcul pour l'aspiration (asp)

Pour $Q_p = 330000\ \text{m}^3/\text{jour}$

Paramètres donnés :

$$Q_p = 330000\ \text{m}^3/\text{jour}$$

$$S_{\text{asp}} = 0.707304527\ \text{m}^2$$

calcul du diamètre (D_{asp}) :

$$S_{asp} = 4 \cdot S_{asp}$$
$$D_{asp} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{asp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.707304527}{\pi}} = 0.94898 \text{ m} = 948.98 \text{ mm}$$

Diamètre sélectionné (D_{nasp}) :

Après étude technique et économique :

$$D_{nasp} = 1000 \text{ mm}$$

Recalcul de la section (S_{asp}) :

$$S_{asp} = \frac{\pi \cdot (D_{nasp})^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1000 \text{ mm})^2}{4} = 0.785398163 \text{ m}^2$$

calcul de la vitesse de l'eau ($V_{\text{réel asp}}$) :

$$V_{\text{réel asp}} = \frac{Q_p}{S_{asp} \cdot 86400 \text{ s}} = \frac{330000 \text{ m}^3/\text{jour}}{0.785398163 \text{ m}^2 \cdot 86400 \text{ s}} = 1.351 \text{ m/s}$$

Pour $Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$

Paramètres donnés :

$$Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$S_{asp} = 0.655864198 \text{ m}^2$$

calcul du diamètre (D_{asp}) :

$$S_{asp} = 4 \cdot S_{asp}$$
$$D_{asp} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{asp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.655864198}{\pi}} = 0.91382 \text{ m} = 913.82 \text{ mm}$$

Diamètre sélectionné (D_{nasp}) :

Après étude technique et économique :

$$D_{nasp} = 1000 \text{ mm}$$

Recalcul de la section (Sasp) :

$$S_{asp} = \frac{\pi \cdot (D_{nasp})^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1000 \text{ mm})^2}{4} = 0.785398163 \text{ m}^2$$

calcul de la vitesse de l'eau (Vréel asp) :

$$V_{réel \text{ asp}} = \frac{Q_p}{S_{asp} \cdot 86400 \text{ s}} = \frac{306000 \text{ m}^3/\text{jour}}{0.785398163 \text{ m}^2 \cdot 86400 \text{ s}} = 1.253 \text{ m/s}$$

calcul pour le refoulement (ref)

Pour $Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$

Paramètres donnés :

$$Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$S_{ref} = 0.353652263 \text{ m}^2$$

calcul du diamètre (Dref) :

$$D_{ref} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{ref}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.353652263}{\pi}} = 0.67103 \text{ m} = 671.03 \text{ mm}$$

Diamètre sélectionné (Dnref) :

Après étude technique et économique :

$$D_{nref} = 1000 \text{ mm}$$

Recalcul de la section (Sref) :

$$S_{ref} = \frac{\pi \cdot (D_{nref})^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1000 \text{ mm})^2}{4} = 0.785398163 \text{ m}^2$$

calcul de la Vitesse de l'Eau (Vréel ref) :

$$V_{réel \text{ ref}} = \frac{Q_p}{S_{ref} \cdot 86400 \text{ s}} = \frac{330000 \text{ m}^3/\text{jour}}{0.785398163 \text{ m}^2 \cdot 86400 \text{ s}} = 1.351 \text{ m/s}$$

Pour $Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$

Paramètres donnés :

$$Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$S_{\text{ref}} = 0.327932099 \text{ m}^2$$

calcul du diamètre (D_{ref}) :

$$S_{\text{ref}} = 4 \cdot S_{\text{ref}}$$
$$D_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{ref}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.327932099}{\pi}} = 0.64617 \text{ m} = 646.17 \text{ mm}$$

Diamètre sélectionné ($D_{n\text{ref}}$) :

Après étude technique et économique :

$$D_{n\text{ref}} = 1000 \text{ mm}$$

Recalcul de la section (S_{ref}) :

$$S_{\text{ref}} = \frac{\pi \cdot (D_{n\text{ref}})^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1000 \text{ mm})^2}{4} = 0.785398163 \text{ m}^2$$

calcul de la Vitesse de l'Eau ($V_{\text{réel ref}}$) :

$$V_{\text{réel ref}} = \frac{Q_p}{S_{\text{ref}} \cdot 86400 \text{ s}} = \frac{306000 \text{ m}^3/\text{jour}}{0.785398163 \text{ m}^2 \cdot 86400 \text{ s}} = 1.253 \text{ m/s}$$

Valeurs calculées

Rugosité (PRV) : 0.0015

Rugosité relative : 0.0000015

Cas 1 : Débit ($Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$)

Pour l'Aspiration (V_{asp}) :

Re (V_{asp})	1,350,852.14
λ (asp)	0.0111110199
ha (m)	0.008266629

Pour le Refoulement (V_{ref}) :

Re (Vref)	1,350,852.14
λ (ref)	0.011110199
href (m)	0.010333286

Cas 2 : Débit ($Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$)

Pour l'Aspiration (Vasp) :

Re (Vasp)	1,252,608.348
λ (asp)	0.011249951
ha (m)	0.007197343

Pour le Refoulement (Vref) :

Re (Vref)	1,252,608.348
λ (ref)	0.011249951
href (m)	0.008996679

calcul de la perte de charge linéaire totale

TABLE 4.4 – Perte de charge linéaire totale (hliniare total)

Débit (m^3/jour)	Perte de charge linéaire totale (m)
330000	0.018599915
306000	0.016194022

calcul de la perte de charge singulière

Les pertes de charge singulières sont dues aux différents éléments de la canalisation tels que les coudes, les vannes, les clapets, etc. Chaque élément contribue à La perte de charge totale à travers des coefficients spécifiques.

L'équation pour calculer la perte de charge singulière ($h_{\text{singulière}}$) est donnée par :

$$h_{\text{singulière}} = \sum (\text{Coefficient de perte} \times \frac{V^2}{2g}) \quad (4.10)$$

où V est la vitesse de l'eau, g est l'accélération due à la gravité, et les coefficients de perte dépendent du type de singularité.

calcul de la perte de charge singulière totale

Maintenant, nous allons calculer la perte de charge singulière totale en additionnant les pertes de charge pour l'aspiration (Asp) et le refoulement (Ref). Ces deux valeurs nous permettront d'obtenir La perte de charge totale du système. Les calculs précédents ont

TABLE 4.5 – Perte de charge singulière pour aspiration (Asp) et refoulement (Ref)

Singularité	Coef de perte	Perte de charge asp (m)	Perte de charge ref (m)
Coude 90°	0.9	0.0837	0.0837
Coude 45°	0.5	0	0
Tée	0.6	0	0
Vanne papillon	0.6	0.0558	0.0558
Clapet anti-retour	2.5	0	0.2325
Joint de dilatation en caoutchouc	0.2	0	0
Réducteur (Elargissement)	0.5	0	0.0465
Réducteur (rétrécissement)	0.5	0.0465	0
Du réservoir vers conduite	0.5	0.0465	0
De la conduite vers réservoir	1	0	0
h sing ref vers collecteur (m)	1	0	0.1023
	somme	0.2325	0.5208

établi les pertes spécifiques pour chaque type de singularité dans les conduites, maintenant nous consolidons ces valeurs pour évaluer l'impact global sur le système hydraulique.

calcul de La perte de charge totale dans le bassin captage

Avant de calculer La perte de charge totale entre l'ouvrage de captage et le clarificateur, il est nécessaire d'évaluer le cas le plus défavorable, qui suppose que le collecteur présente une longueur de 35 mètres. Dans ce contexte, nous devons calculer la perte de charge linéaire du collecteur, influencée par la rugosité de sa paroi interne et le débit d'eau. Cette étape est cruciale pour estimer avec précision La perte de charge totale sur cette section spécifique du réseau hydraulique.

TABLE 4.6 – Perte de charge singulière pour aspiration (Asp) et refoulement (Ref)

Singularité	Coef de perte	Perte de charge asp (m)	Perte de charge ref (m)
Coude 90°	0.9	0.071973747	0.071973747
Coude 45°	0.5	0	0
Tée	0.6	0	0
Vanne papillon	0.6	0.047982498	0.047982498
Clapet anti-retour	2.5	0	0.199927074
Joint de dilatation en caoutchouc	0.2	0	0
Réducteur (Elargissement)	0.5	0.039985415	0.039985415
Réducteur (rétrécissement)	0.5	0.039985415	0
Du réservoir vers conduite	0.5	0.039985415	0
De la conduite vers réservoir	1	0	0
h sing ref vers collecteur (m)	1	0	0.0880
	somme	0.1999	0.4478

TABLE 4.7 – Perte de charge singulière totale (hsingulière total)

Débit (m ³ /jour)	Perte de charge singulière totale (m)
330000	0.5312
306000	0.4568

TABLE 4.8 – Données Fournies et calculées

Paramètre	Qp = 330000 m ³ /j	Qp = 306000 m ³ /j
Qentre (m ³ /s)	4.24	3.94
Dn (mm)	1400	1400
Vitesse réelle (m/s)	2.756841103	2.556343568
Rugosité (PRV) (mm)	0.0015	0.0015
Rugosité relative	0.0000011	0.0000011
Re	3859577.54	3578881.00
λ	0.00940	0.00950
Longuer de la conduite (m)	35	35
Hlin collecteur (m)	0.0910	0.0791
Hsin collecteur (m)	0.6585	0.5662
H total collecteur+captage (m)	1.2807	1.1022

4.4 calcul de La perte de charge totale entre ouvrage (bassin de captage et clarificateur)

Maintenant nous allons procéder au calcul de La perte de charge totale entre les deux ouvrages le bassin de captage et le clarificateur.

calcul de perte de charge linéaire

TABLE 4.9 – Perte de charge linéaire

Paramètre	Qp = 330000 m ³ /j	Qp = 306000 m ³ /j
Qentre (m ³ /s)	4.24	3.94
Dn (mm)	1400	1400
Vitesse réelle (m/s)	2.756841103	2.556343568
Rugosité (PRV) (mm)	0.0015	0.0015
Rugosité relative	0.0000011	0.0000011
Re	3859577.54	3578881.00
λ	0.00940	0.00950
Longuer de la conduite (m)	90	90
Hlin (conduite) (m)	0.2340	0.2035
Hlin (bassin coagulation)	0.234	0.2012
Hlin (3 bassins coagulation)	0.7020	0.6036
Hlin total (m)	0.9360	0.8071

calcul de perte de charge singulière

L'équation pour calculer la perte de charge singulière ($h_{\text{singulière}}$) est donnée par :

$$h_{\text{singulière}} = \sum (\text{Coefficient de perte} \times \frac{V^2}{2g}) \quad (4.11)$$

où V est la vitesse de l'eau, g est l'accélération due à la gravité, et les coefficients de perte dépendent du type de singularité.

TABLE 4.10 – Perte de charge singulière pour $Q_p = 330000 \text{ m}^3/\text{jour}$

Singularité	Perte de charge (m)
Coude 90°	0.697263566
Coude 45°	0
Tée	0.464842377
Vanne papillon	0
Clapet anti-retour	0
Joint de dilatation en caoutchouc	0
Réducteur (Elargissement)	0
Réducteur (rétrécissement)	0
Du réservoir vers conduite	0
De la conduite vers réservoir	0
Bassin de coagulation (3)	0.1.0458
Somme	2.2080

TABLE 4.11 – Perte de charge singulière pour $Q_p = 306000 \text{ m}^3/\text{jour}$

Singularité	Perte de charge (m)
Coude 90°	0.599531416
Coude 45°	0
Tée	0.399687611
Vanne papillon	0
Clapet anti-retour	0
Joint de dilatation en caoutchouc	0
Réducteur (Elargissement)	0
Réducteur (rétrécissement)	0
Du réservoir vers conduite	0
De la conduite vers réservoir	0
Bassin de coagulation (3)	0.8992
Somme	1.8985

calcul de La perte de charge totale

La perte de charge totale est la somme des pertes singulières et linéaires le long la conduite de 90 m (cas défavorable). Elle inclut également les pertes dues aux bassins de captage, fournissant ainsi une estimation complète des pertes.

TABLE 4.12 – Perte de charge totale entre ouvrage (H total)

Débit (m^3/jour)	Perte de charge totale (m)
330000	4.4247
306000	3.8079

4.5 Détermination de la hauteur géométrique

Après avoir calculé la perte de charge (H_{vf}), nous devons maintenant déterminer la hauteur géométrique (H_{geo}) du système. Pour cela, nous suivons les étapes suivantes :

1. Point de départ : le réservoir d'eau filtrée

Nous commençons par le point le plus bas du système, c'est-à-dire le réservoir d'eau filtrée, qui sert de référence pour mesurer la hauteur géométrique.

2. Étape suivante : filtre à sable gravitaire

À partir du réservoir d'eau filtrée, nous déterminons la hauteur nécessaire pour atteindre le filtre à sable gravitaire. Nous notons cette différence de hauteur.

3. Progression vers le décanteur

Après le filtre à sable gravitaire, nous mesurons la hauteur géométrique jusqu'au décanteur, en ajoutant cette hauteur à la mesure précédente.

4. Montée vers le bassin de floculation

Ensuite, nous calculons la hauteur géométrique entre le décanteur et le bassin de floculation, ajoutant cette nouvelle hauteur au cumul précédent.

5. Dernière étape : bassin de coagulation

Enfin, nous déterminons la hauteur géométrique nécessaire pour atteindre le bassin de coagulation depuis le bassin de floculation. Cela complète notre mesure de la hauteur géométrique totale (H_{geo}).

En combinant ces étapes, nous obtenons la hauteur géométrique totale nécessaire pour notre système. Cette hauteur doit être ajoutée aux pertes de charge (H_{vf}) et à la variation de pression (ΔP) pour calculer la hauteur manométrique totale (HMT). Le calcul de la HMT nous permettra de sélectionner une pompe capable de fournir la pression et le débit nécessaires pour un fonctionnement optimal du système.

réservoir d'eau filtrée

Nous sommes maintenant dans le réservoir d'eau filtrée. Ce réservoir joue un rôle crucial dans le système, en recevant le débit entrant et en permettant le calcul des paramètres

nécessaires pour la détermination de la hauteur géométrique (H_{geo}).

$$H_{vf} = \frac{(\text{Coefficient de perte de charge} \cdot \text{Vitesse}^2)}{2 \cdot g} \quad (4.12)$$

Les paramètres du réservoir d'eau filtrée sont les suivants :

TABLE 4.13 – Les paramètres de réservoir d'eau filtrée à l'intérieur

Paramètre	Variant 1	Variant 2
Ouverture (H x L)	1 m x 3 m	1 m x 3 m
Nombre d'ouvertures	7	7
Section totale (m ²)	21	21
Coeff. de perte de charge	0.8	0.8
Débit (Q _p)	330000 m ³ /jour	306000 m ³ /jour
Débit entrant (Q _{entre} par ligne)	4.24 m ³ /s	3.94 m ³ /s
Vitesse (m/s)	0.404174015	0.374779541
Perte de charge par ouverture (m)	0.006660821	0.005727205
Perte de charge totale (m)	0.046625747	0.040090436

Le tableau présente les paramètres d'un réservoir d'eau filtrée selon deux variantes. Les deux variantes partagent des dimensions structurelles identiques avec une ouverture de 1 mètre de hauteur et 3 mètres de longueur, comprenant 7 ouvertures et une surface totale de section de 21 mètres carrés. Les deux variantes présentent un coefficient de perte de charge de 0,8.

En termes de métriques opérationnelles, la Variante 1 gère un débit (Q_p) de 330 000 mètres cubes par jour, avec un débit d'entrée (Q_{entre} par ligne) de 4,24 mètres cubes par seconde, ce qui correspond à une vitesse de 0,404 mètres par seconde. Elle subit une perte de charge de 0,0067 mètre par ouverture et une perte de charge totale de 0,0466 mètre.

Pendant ce temps, la Variante 2 fonctionne à un débit légèrement inférieur (Q_p) de 306 000 mètres cubes par jour, avec un débit d'entrée (Q_{entre} par ligne) de 3,94 mètres cubes par seconde et une vitesse correspondante de 0,375 mètres par seconde. Elle présente une perte de charge de 0,0057 mètre par ouverture et une perte de charge totale de 0,0401 mètre.

Les différences entre les deux variantes mettent en évidence des capacités de débit variées et des caractéristiques hydrauliques résultantes au sein du système de réservoir.

Ce tableau présente les paramètres clés à l'entrée du réservoir d'eau filtrée. Il capture les débits d'entrée, les dimensions structurelles, et les caractéristiques hydrauliques initiales qui influencent le fonctionnement global du système.

TABLE 4.14 – Paramètres à l'entrée du réservoir d'eau filtrée

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit (Qp)	330000 m ³ /jour	306000 m ³ /jour
Débit entrant total (Qentre total) (m ³ /s)	8.49	7.87
hauteur d'ouverture (H) (m)	1.9	1.9
Longueur d'ouverture (L) (m)	6.4	6.4
Nombre d'ouvertures	1	1
Section totale (m ²)	12.16	12.16
Coefficient de perte de charge	0.8	0.8
Vitesse (m/s)	0.697997888	0.647234405
Perte de charge par ouverture (m)	0.019865486	0.017081035
Perte de charge totale (m)	0.019865486	0.017081035

Partie entre filtre a sable et réservoir d'eau filtrée

Les paramètres hydrauliques présentés dans le tableau sont calculés selon les équations suivantes :

— **Section (Section) :**

$$\text{Section} = \frac{\text{Débit (Qentre)}}{\text{Vitesse (Vitesse)}} \quad (4.13)$$

— **Profondeur hydraulique (H canal) :**

$$H \text{ canal} = \sqrt{\frac{\text{Section}}{2}} \quad (4.14)$$

— **Longueur du canal (L canal) :**

$$L \text{ canal} = \frac{\text{Section}}{H \text{ canal}} \quad (4.15)$$

— **Périmètre mouillé (P) :**

$$P = 2 \times H \text{ canal} + L \text{ canal} \quad (4.16)$$

— **Rayon hydraulique (R) :**

$$R = \frac{\text{Section}}{P} \quad (4.17)$$

— **Pente (Pente) :**

$$\text{Pente} = \frac{(\text{Manning} \times \text{Vitesse})^2}{R} \quad (4.18)$$

— **Perte de charge linéaire (Perte de charge linéaire) :**

$$\text{Perte de charge linéaire} = \text{Pente} \times L \text{ canal} \quad (4.19)$$

— Perte de charge singulière (Perte de charge singulière) :

$$H_{vf} = \frac{(\text{Coefficient de perte de charge} \cdot \text{Vitesse}^2)}{2 \cdot g} \quad (4.20)$$

— Perte de charge totale (Perte de charge totale) :

$$\text{Perte de charge totale} = \text{Perte de charge linéaire} + \text{Perte de charge singulière} \quad (4.21)$$

— Niveau d'eau (Cote) :

$$\text{Cote} = \text{Cote entrée du REF} + \text{Perte de charge totale} \quad (4.22)$$

TABLE 4.15 – Paramètres du canal filtre à sable - réservoir d'Eau Filtrée

Paramètre	Variant 1	Variant 2
Qp (Débit)	330000 m ³ /j	306000 m ³ /j
Qentre par linge (m ³ /s)	4.24	3.94
Longueur du conduite (m)	40	40
Vitesse (m/s)	1.26	1.26
Section (m ²)	3.368116794	3.123162845
Manning (béton)	0.0138	0.0138
H canal (m)	1.297712756	1.249632515
L canal (m)	2.595425512	2.49926503
P (m)	5.190851024	4.99853006
R (m)	0.648856378	0.624816258
Pente	0.000465962	0.00048389
Perte de charge linéaire (m)	0.018638488	0.019355613
Perte de charge singulière (m)	0.064733945	0.064733945
Perte de charge totale (m)	0.083372433	0.084089558
Cote entré du REF (m)	2.5	2.5
Cote sortie de FAS (m)	2.518638488	2.519355613
charge entré de REF (m)	3.3	3.3
charge sortie de FAS (m)	3.402010921	3.403445171

4.6 dimensionnement de filtre à sable

Canal-filtre à sable

Après avoir calculé les dimensions du canal hydraulique, celui-ci rencontre l'ouvrage du filtre à sable. Cette rencontre marque un point critique dans la conception du système de filtration.

TABLE 4.16 – Paramètres du canal filtre à sable - collecteur

Paramètre	Variant 1	Variant 2
Qp (Débit)	330000 m ³ /j	306000 m ³ /j
Qentre par linge (m ³ /s)	4.24	3.94
Longueur du conduite (m)	110	110
Vitesse (m/s)	1.26	1.26
Section (m ²)	3.368116794	3.123162845
Manning (béton)	0.0138	0.0138
H canal (m)	1.297712756	1.249632515
L canal (m)	2.595425512	2.49926503
P (m)	5.190851024	4.99853006
R (m)	0.648856378	0.624816258
Pente	0.000465962	0.00048389
Perte de charge linéaire (m)	0.051255842	0.053227936
Perte de charge linéaire majorée (m)	0.1	0.1
Perte de charge singulière (m)	0.064733945	0.064733945
Perte de charge singulière majorée (m)	0.1	0.1
Perte de charge totale (m)	0.115989787	0.20
Cote sortie de FAS (m)	2.518638488	2.519355613
Cote début de collecteur (m)	2.56989433	2.572583549
charge sortie de FAS (m)	3.402010921	3.403445171
charge début de collecteur (m)	3.569256549	3.656673107

Explication : La vitesse d'écoulement a été fixée à 1.26 m/s par les ingénieurs en raison de leur expérience pratique. Les pertes de charge linéaire et singulière sont indiquées comme ayant été majorées à 0.1 m chacune par mesure de précaution. Étant donné que le système fonctionne sous gravité, une marge de sécurité est cruciale pour assurer un fonctionnement fiable et efficace du filtre à sable et du collecteur associé.

filtre à sable (Canal extérieur)

Le filtre à sable est une composante essentielle du système de traitement, intervenant après la filtration primaire pour assurer une purification supplémentaire de l'eau. Ce dispositif est conçu pour gérer des débits élevés tout en maintenant des vitesses d'écoulement relativement basses, optimisant ainsi l'efficacité du processus de filtration.

TABLE 4.17 – Paramètres du filtre à sable (Canal extérieur)

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Qp (Débit)	330000 m ³ /j	306000 m ³ /j
Qentre par linge (m ³ /s)	4.24	3.94
Nb ligne	2	2
Nb de FAS par ligne	16	16
Q par FAS (m ³ /s)	0.265239198	0.245949074
Dn (mm)	1200	1200
Vitesse réelle (m/s)	0.234522941	0.217466727
Perte de charge singulière	0.002242651	0.001928309
Épaisseur du béton (m)	0.5	0.5
Cote début de collecteur (m)	2.56989433	2.572583549
Cote inf passmur (m)	4.367607086	4.322216064

Explication : Bien que la vitesse de l'eau soit inférieure à la limite de la condition d'autocurage, cela ne posera aucun problème ni ne causera de dommages, car l'eau avec laquelle nous travaillons à cette étape est déjà filtrée et contient très peu, voire aucune, Matières en Suspension (MES).

filtre à sable (Canal intérieur)

Le canal intérieur du filtre à sable fait référence au canal situé entre deux filtres où l'eau filtrée est collectée avant d'être dirigée vers le canal principal. Ce canal assure la collecte et le transfert de l'eau purifiée vers les étapes suivantes du processus de traitement. Il joue un rôle crucial en permettant la consolidation et la redistribution de l'eau filtrée pour assurer une efficacité maximale du système de filtration.



FIGURE 4.3 – Canal intérieur du filtre à sable

TABLE 4.18 – Paramètres du canal intérieur du filtre à sable

Paramètre	Variant 1	Variant 2
Q par FAS (m ³ /s)	0.265239198	0.245949074
Ouverture par côté du filtre	39	39
Ouverture par filtre	78	78
Longueur du filtre (m)	18	18
Largeur d'ouverture (mm)	100	100
hauteur d'ouverture (mm)	200	200
Section par ouverture (m ²)	0.02	0.02
Section totale pour le canal (m ²)	1.56	1.56
Vitesse (m/s)	0.170025127	0.157659663
Perte de charge par ouverture (m)	0.001178738	0.00101352
Cote inférieure de l'ouverture (m)	5.567607086	5.522216064

Explication de la faible vitesse

La faible vitesse de l'eau à travers les petits trous du canal intérieur du filtre à sable est tout à fait normale. Cette configuration est conçue pour permettre un écoulement doux et contrôlé, facilitant ainsi une filtration efficace. Étant donné que l'eau a déjà été filtrée à travers le système principal, il n'y a aucun risque de dépôts de matières en suspension (MES). Ainsi, cette faible vitesse garantit un processus de purification continu sans compromettre la qualité de l'eau traitée.

Les couches de filtre

Dans le filtre à sable, nous utilisons des filtres à lit peu profond, particulièrement adaptés aux eaux ayant une faible turbidité (< 5 NTU) et une faible teneur en matières organiques (COT < 2 mg/L). Ces valeurs ont été adaptées car le filtre intervient après la clarification par coagulation, floculation et décantation.

Les couches de filtre sont recommandées comme suit :

- **Couche d'anthracite/pierre ponce** : Pour les filtres à lit peu profond, la profondeur de cette couche est recommandée entre 0.4 à 0.8 m (1.3 à 2.6 pieds) [10]. Cette couche est essentielle pour capturer les particules fines et améliorer la qualité de l'eau filtrée.
- **Couche de sable** : La profondeur de cette couche est recommandée entre 0.4 à 0.6 m (1.3 à 2.0 pieds) [10]. Le sable joue un rôle crucial dans la filtration des matières en suspension restantes.
- **Couche de gravier** : La profondeur de cette couche est de 300 mm [10]. Elle est utilisée pour supporter les couches filtrantes supérieures et assurer une distribution uniforme de l'eau.

TABLE 4.19 – Les paramètres de la couche de filtre

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Qp (m ³ /j)	330000	306000
Filtralite (0.8-1.6mm) (mm)	600	600
sable (0.4-0.8 mm) (mm)	400	400
Gravier (mm)	300	300
Épaisseur du filtre total (mm)	1,300	1,300
Épaisseur du béton (mm)	15	15
Épaisseur de la dalle filtrante (mm)	300	300
Côte supérieure du filtre (m)	7.182607086	7.137216064

TABLE 4.20 – Profondeur d'eau système de fonctionnement : normal

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Q par FAS (m ³ /s)	0.265239198	0.245949074
Perte de charge du filtre (m)	0.05	
charge d'eau (m)	0.25	
Côte d'eau sur le média (m)	7.432607086	7.387216064

Explication : La perte de charge du filtre est fixée à 0.05 m par les ingénieurs pour assurer le bon fonctionnement du filtre. De plus, une charge d'eau de 0.25 m est maintenue par mesure de précaution pour garantir une efficacité optimale du filtre sans risque de dysfonctionnement.

TABLE 4.21 – Profondeur d'eau système de fonctionnement : lavage

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Q par FAS (m ³ /s)	0.265239198	0.245949074
charge d'eau system lavage (m)	1.2	1.2
Cote d'eau sur le media (m)	8.382607086	8.337216064

Explication : Cette configuration de profondeur d'eau élevée est spécifique au processus de lavage. L'élévation temporaire du niveau d'eau ne nuit pas à notre ouvrage, car elle est de courte durée et ne se produit pas fréquemment.

TABLE 4.22 – calcul deversoir eau clarifiée

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Q par FAS (m ³ /s)	0.265239198	0.245949074
Largeur du deversoir (m)	3.7	3.7
Nombre de deversoir par cellule	14	14
Q débit transitant (débit par deversoir)(m ³ /s)	0.009472828	0.008783896
Perte par deversoir (m)	0.012463502	0.011851639
hauteur du deversoir (mm)	300	300
Épaisseur du béton (mm)	150	150
Cote inf du deversoir (m)	8.382607086	8.337216064
Cote sup deversoir (m)	8.832607086	8.787216064
charge d'eau deversoir (m)	8.845070588	8.799067703

Équation de calcul de la perte de charge dans le déversoir :

L'équation utilisée pour calculer la perte de charge dans le déversoir situé en haut du filtre est la suivante :

$$Q = C_e \times L \times (H_e^{3/2}) \quad (4.23)$$

Où :

- Q : Débit traversant le déversoir (m³/s)
- C_e : Coefficient de crête de déversoir (1.84)
- L : Longueur du déversoir (m)
- H_e : Perte de charge dans le déversoir (m)

Cette équation permet de déterminer le débit traversant le déversoir en fonction de sa longueur et de la perte de charge au niveau du déversoir.

Canal supérieur entre deux filtres à sable :

Le canal supérieur entre deux filtres à sable (voir Table 4.25) joue un rôle crucial dans le traitement des eaux usées, en transportant l'eau préalablement traitée par le clarificateur. Ce dernier est responsable des étapes de coagulation, floculation et décantation, où les impuretés sont agrégées et séparées par sédimentation. Une fois purifiée dans le clarificateur, l'eau transite par ce canal avant d'être filtrée à travers les filtres à sable. Les paramètres clés tels que le débit, la vitesse et les pertes de charge sont essentiels pour assurer un fonctionnement efficace de ce système hydraulique complexe.

Formules utilisées pour calculer la perte de charge due à l'ouverture :

1. Débit (Q) :

$$Q = \text{Section} \times \text{Vitesse} \quad (4.24)$$

Où Section (m²) et Vitesse (m/s) sont calculées en fonction des conditions spécifiques d'écoulement.

2. **Vitesse (V) :**

$$V = \frac{Q}{\text{Section}} \quad (4.25)$$

3. **Section de la surface (A) :**

$$A = \text{Largeur} \times \text{hauteur} \quad (4.26)$$

4. **Perte de charge hydraulique :**

$$H_{vf} = \frac{(\text{Coefficient de perte de charge} \cdot \text{Vitesse}^2)}{2 \cdot g} \quad (4.27)$$

TABLE 4.23 – Pertes de charge due aux ouvertures supérieur

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Q par FAS (m ³ /s)	0.265239198	0.245949074
Cote inférieure d'ouverture (m)	8.532607086	8.487216064
Nombre d'ouverture par cellule	14	14
Débit par ouverture (m ³ /s)	0.018945657	0.017567791
Largeur d'ouverture (mm)	400	400
hauteur d'ouverture (mm)	300	300
Cote supérieure d'ouverture (m)	8.832607086	8.787216064
Section (m ²)	0.12	0.12
Vitesse (m/s)	0.157880475	0.146398258
Perte de charge (m)	0.001016361	0.000873902
Par majoration (m)	0.01	0.01

1. **Longueur du canal (L_{canal}) :**

$$L_{\text{canal}} = \frac{\text{Section}}{H_{\text{canal}}} \quad (4.28)$$

2. **Périmètre mouillé (P) :**

$$P = 2 \times H_{\text{canal}} + L_{\text{canal}} \quad (4.29)$$

3. **Rayon hydraulique (R) :**

$$R = \frac{\text{Section}}{P} \quad (4.30)$$

4. **Pente (Pente) :**

$$\text{Pente} = \frac{(\text{Manning} \times \text{Vitesse})^2}{R} \quad (4.31)$$

5. Perte de charge linéaire (Perte de charge linéaire) :

$$\text{Perte de charge linéaire} = \text{Pente} \times L_{\text{canal}} \quad (4.32)$$

6. Perte de charge singulière (H_{vf}) :

$$H_{vf} = \frac{(\text{Coefficient de perte de charge} \cdot \text{Vitesse}^2)}{2 \cdot g} \quad (4.33)$$

7. Perte de charge linéaire (Perte de charge linéaire) :

$$\text{Perte de charge linéaire} = f \times \frac{L}{R} \times \frac{V^2}{2g} \quad (4.34)$$

Où f est le coefficient de frottement (sans dimension), L (m) est la longueur du canal, R (m) est le rayon hydraulique, V (m/s) est la vitesse d'écoulement, et g est l'accélération due à la gravité (m/s^2).

8. Perte de charge singulière (Perte de charge singulière) :

$$\text{Perte de charge singulière} = k \times \frac{V^2}{2g} \quad (4.35)$$

Où k est un coefficient qui dépend du type de singularité, V (m/s) est la vitesse d'écoulement, et g est l'accélération due à la gravité (m/s^2).

TABLE 4.24 – Canal supérieur entre deux filtres à sable

Paramètre	Valeur 1	Valeur 2
Q par FAS (m ³ /s)	0.265239198	0.245949074
Longueur du canal (m)	18	18
Vitesse (m/s)	0.4	0.4
Section (m ²)	0.663097994	0.614872685
Manning (béton)	0.0138	0.0138
Largeur du canal (m)	1.4	1.4
hauteur (m)	0.473641424	0.439194775
hauteur suppo (m)	0.5	0.5
Section réelle (m ²)	0.7	0.7
Vitesse réelle (m/s)	0.378913139	0.35135582
P (m)	2.4	2.4
R (m)	0.291666667	0.291666667
Pente	0.00009	0.00008
Perte de charge linéaire (m)	0.00168742	0.001450902
Perte de charge singulière (m)	0.006523955	0.006523955
Perte totale (m)	0.00821138	0.007974857
Avec majoration (m)	0.02	0.02
Différence de cote entre ouverture et canal (m)	0.2	0.2
Cote inférieure du canal (m)	8.332607086	8.287216064
Cote d'eau du canal (m)	8.865070588	8.819067703
Chute niveau d'eau intérieur du canal et cote sup du canal	0.2	0.2
Cote supérieure du canal (m)	9.065070588	9.019067703

4.6.1 Le collecteur avec déversoir entre les canaux et le collecteur principal

Dans le contexte des systèmes de filtration multi-média, le collecteur joue un rôle central en transportant l'eau traitée du système de clarification vers les canaux de distribution qui se subdivisent ensuite vers deux filtres distincts. Après avoir détaillé les caractéristiques et le fonctionnement des canaux, cette section se focalise sur le segment crucial qui relie ces canaux au collecteur principal.

Cette interface comprend un déversoir, élément essentiel pour réguler le flux et maintenir une hauteur d'eau appropriée, assurant ainsi une distribution homogène de l'eau traitée. Le déversoir permet de contrôler la décharge hydraulique et de prévenir les variations brusques de niveau d'eau, garantissant une opération stable et efficace du système de filtration.

Le collecteur avec déversoir assure non seulement la continuité du flux hydraulique entre les différentes composantes du système de traitement de l'eau, mais il joue également un rôle crucial dans l'optimisation de la performance globale du processus de filtration. En gérant efficacement les pertes de charge et en maintenant des conditions hydrauliques optimales, cette partie du système contribue de manière significative à la qualité et à l'efficacité du traitement de l'eau.

TABLE 4.25 – Paramaters des canaux et le collecteur principal

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Q par FAS (m ³ /s)	0.265239198	0.245949074
Marge du sécurité (m)	0.18	0.18
Cote Sup du déversoir (Canal/collecteur) (m)	9.045070588	8.999067703
Largeur du canal (m)	1.4	1.4
Coef du déversoir crête mence	1.84	1.84
Perte de charge (m)	0.219682046	0.20889733
Cote d'eau collecteur/déversoir (m)	9.264752633	9.207965033
Nombre d'ouverture par filtre	1	1
Largeur (m)	1.4	1.4
hauteur (m)	0.3	0.3
Section (m ²)	0.42	0.42
Vitesse (m/s)	0.631521899	0.585593034
Perte de charge (m)	0.01626177	0.013982434
Perte de charge sélectionnée (m)	0.015	0.015
Cote d'eau à l'intérieur à l'ouverture (m)	9.279752633	9.222965033

Le collecteur principal dans la conception de la station de dessalement

Ci-dessous sont présentés les paramètres principaux du collecteur principal entre le filtre à sable et le clarificateur dans la conception de la station de dessalement :

TABLE 4.26 – conception du collecteur principal

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Qentre par ligne (m ³ /s)	4.24	3.94
Longueur du collecteur (m)	160	160
Vitesse suppo (m/s)	1.2	1.2
Section (m ²)	3.536522634	3.279320988
Manning (béton)	0.0138	0.0138
H canal (m)	1.329759872	1.280492286
L canal (m)	2.659519744	2.560984571
P (m)	5.319039488	5.121969143
R (m)	0.664879936	0.640246143
Pente	0.000412456	0.000428325
Perte de charge linéaire (m)	0.065992931	0.068532043
Perte de charge singulière (m)	0.058715596	0.058715596
Perte de charge totale (m)	0.124708528	0.127247639
Cote d'eau collecteur début	9.404461161	9.350212672

TABLE 4.27 – Distribution principale du canal clarif-filtre

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit (m ³ /s)	4,24	3,94
Longueur du canal (m)	150	150
Vitesse nominale (m/s)	1,4	1,4
Section transversale (m ²)	3,0313	2,8108
Coefficient de Manning (béton)	0,0138	0,0138
Profondeur du canal (m)	1,2311	1,1855
Longueur du canal (m)	2,4622	2,3710
Périmètre (m)	4,9245	4,7420
Rayon hydraulique (m)	0,6156	0,5928
Pente	0,0006064	0,0006297
Pente (avec marge de sécurité)	0,002	0,002
Perte de charge linéaire (m)	0,3	0,3
Perte de charge singulière (m)	0,0799	0,0799
Perte de charge totale (m)	0,3799	0,3799
Niveau de sortie du clarificateur (m)	9,7844	9,7301

4.7 Dimensionnement du clarificateur

La conception et le Dimensionnement de notre système de clarificateur sont essentiels pour garantir un traitement efficace de l'eau. Ce système se compose de trois composants critiques : le bassin de coagulation, le bassin de floculation et le décanteur lamellaire. Chaque composant joue un rôle vital dans le processus global de purification de l'eau.

- **Bassin de coagulation** : C'est ici que se produit le mélange initial des coagulants avec l'eau brute. L'objectif principal de cette étape est de déstabiliser les particules en suspension, leur permettant de s'agréger en floccs plus gros.
- **Bassin de floculation** : Dans cette étape, les floccs formés sont lentement mélangés pour devenir encore plus gros et plus stables. Cette phase est cruciale pour préparer les floccs à la décantation.
- **Décanteur lamellaire** : Ce composant final permet la sédimentation des floccs. Grâce à sa conception en lamelles, il augmente la surface de décantation effective, facilitant ainsi la séparation des solides de l'eau clarifiée.

Dans les sections suivantes, nous présenterons en détail les paramètres de conception de chaque composant, en mettant en avant les variantes et les choix techniques effectués pour optimiser le fonctionnement du système de clarification.

Décanteur lamellaire

Dans le cadre de la conception de notre clarificateur, comprenant le bassin de coagulation, le bassin de floculation et le décanteur lamellaire, nous avons soigneusement analysé et calculé les paramètres essentiels pour garantir un fonctionnement optimal. Le tableau suivant présente les paramètres clés du calage et de la conception du décanteur, notamment les marges de sécurité, les dimensions des canaux, et les pertes de charge. Ces paramètres ont été déterminés pour optimiser le processus de décantation et assurer la qualité et l'efficacité du traitement de l'eau.

TABLE 4.28 – Calage et conception Décantier

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Marge de sécurité (m)	0,05	0,05
Cote inférieure du décanteur (m)	9,83	9,78
collecteur du Décantier		
Débit collecteur principal (m ³ /s)	0,71	0,66
Longueur du canal du décanteur (m)	26	26
Vitesse à l'intérieur du décanteur (m/s)	1	1
Section (m ²)	0,7073	0,6559
Coefficient de Manning (béton)	0,0138	0,0138
Profondeur du canal (m)	0,5947	0,5727
Longueur du canal (m)	1,1894	1,1453
hauteur canal réelle (m)	0,6	0,6
Longueur canal réelle (m)	1,2	1,2
Section réelle (m ²)	0,72	0,72
Vitesse à l'intérieur réelle (m/s)	0,9824	0,9109
Périmètre (m)	2,4	2,4
Rayon hydraulique (m)	0,3	0,3
Pente	0,0006126	0,0005267
Perte de charge linéaire (m)	0,0159	0,0137
Perte de charge singulière (m)	0,0393	0,0338
Perte de charge totale (m)	0,0553	0,0475
Cote supérieure du décanteur (m)	9,89	9,83

Pour optimiser le fonctionnement du décantier, il est crucial de déterminer avec précision les caractéristiques des ouvertures. Ces ouvertures jouent un rôle essentiel dans la régulation du débit et dans l'efficacité globale du processus de décantation. Le tableau ci-dessous présente les paramètres détaillés des ouvertures du décantier, incluant le nombre d'ouvertures, leurs dimensions, et les pertes de charge associées. Ces informations sont indispensables pour assurer une répartition uniforme du débit et pour minimiser les pertes de charge, garantissant ainsi une performance optimale du système.

TABLE 4.29 – Les ouvertures du décanteur

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par décanteur (m ³ /s)	0,71	0,66
Nombre d'ouvertures	6	6
Débit par ouverture (m ³ /s)	0,1179	0,1093
hauteur (m)	0,42	0,42
Largeur (m)	0,5	0,5
Section (m ²)	0,21	0,21
Vitesse (m/s)	0,5614	0,5205
Perte de charge singulière (m)	0,0128	0,0110
Par majoration (m)	0,02	0,02
Cote inférieure de l'ouverture (m)	10,83	10,78
Cote supérieure de l'ouverture (m)	11,27	11,22

La conception du canal, incluant le collecteur et le déversoir du décanteur, est cruciale pour assurer une évacuation efficace de l'eau traitée. Le tableau ci-dessous présente les principaux paramètres du canal, tels que le débit, les dimensions, la vitesse de l'eau, et les pertes de charge. Ces éléments sont essentiels pour garantir un flux uniforme et minimiser les pertes d'énergie. En analysant ces paramètres, nous pouvons optimiser la performance hydraulique du système et assurer une gestion efficace des débits dans le décanteur.

TABLE 4.30 – Canal (collecteur/deversoir) du décanteur

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par décanteur (m ³ /s)	0,71	0,66
Nombre de collecteurs	6	6
Débit par collecteur (m ³ /s)	0,1179	0,1093
Longueur (m)	10	10
hauteur (m)	0,42	0,42
Largeur (m)	0,5	0,5
Section (m ²)	0,21	0,21
Vitesse (m/s)	0,5614	0,5205
$2/3 \cdot C_d \cdot \text{Longueur} \cdot \text{racine}(2 \cdot 9,81)$	18,3084	18,3084
Perte de charge (m)	0,0005	0,0005
Perte de charge majorée (m)	0,03	0,03
Cote supérieure du déversoir (m)	11,37	11,32
Cote d'eau intérieur du décanteur (m)	11,40	11,35

L'étude du bassin de décantation est essentielle pour déterminer les caractéristiques hydrauliques optimales permettant de traiter les eaux usées efficacement. Le tableau suivant détaille les principaux paramètres de conception pour le bassin de décantation, incluant le débit par décanteur, le nombre de collecteurs, le débit par collecteur, ainsi que la profondeur d'eau sélectionnée et la cote du radier. Ces données sont fondamentales pour assurer une décantation efficace et un traitement optimal de l'eau.

TABLE 4.31 – Bassin du décantation

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par décanteur (m ³ /s)	0,71	0,66
Nombre de collecteurs	6	6
Débit par collecteur (m ³ /s)	0,1179	0,1093
Profondeur d'eau sélectionnée (m)	6,9	6,9
Cote du radier (m)	4,50	4,45

Bassin de floculation :

Les dispositifs situés entre le bassin du flocculateur et le décanteur jouent un rôle crucial dans le traitement des eaux usées, assurant un transfert efficace et contrôlé du flux d'eau. Le tableau suivant présente les principaux paramètres de conception, notamment le débit par décanteur, le nombre de collecteurs, le débit par collecteur, ainsi que les caractéristiques spécifiques du déflecteur telles que sa largeur, hauteur, et section. Ces paramètres sont essentiels pour assurer une régulation optimale du flux hydraulique, minimisant les pertes de charge et garantissant un fonctionnement efficient du système de traitement des eaux.

TABLE 4.32 – Entre bassin du floc et décanteur

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par décanteur (m ³ /s)	0,71	0,66
Nombre de collecteurs	6	6
Débit par collecteur (m ³ /s)	0,1179	0,1093
Largeur du déflecteur (m)	10	10
hauteur (m)	1,9	1,9
Section du déflecteur (m ²)	19	19
Vitesse (m/s)	0,0372	0,0345
Perte de charge	0,0001	0,0001
Avec majoration (m)	0,05	0,05
Cote d'eau entre floc et décanteur (m)	11,45	11,40

Le bassin de floculation constitue une étape essentielle dans le processus de traitement des eaux, où les particules en suspension sont agglomérées pour faciliter leur séparation ultérieure. Le tableau ci-dessous présente les paramètres clés de conception pour le bassin de floculation. Il inclut le débit par décanteur, le nombre de collecteurs, le débit par collecteur, ainsi que les spécifications relatives aux ouvertures du bassin. Ces dernières comprennent la largeur d'ouverture, la hauteur, la section transversale, la vitesse d'écoulement, et les pertes de charge associées. Ces paramètres sont cruciaux pour garantir un mélange efficace des agents flocculants, facilitant ainsi le processus de clarification des eaux traitées.

TABLE 4.33 – Bassin de floculation

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par décanteur (m ³ /s)	0,71	0,66
Nombre de collecteurs	6	6
Débit par collecteur (m ³ /s)	0,1179	0,1093
Nombre d'ouvertures par bassin	4	4
Largeur d'ouverture (m)	1,2	1,2
hauteur (m)	0,4	0,4
Section (m ²)	0,48	0,48
Vitesse (m/s)	0,3684	0,3416
Perte par ouverture (m)	0,0055	0,0048
Par majoration (m)	0,02	0,02
Cote inférieure d'ouverture (m)	11,47	11,42
Cote supérieure d'ouverture (m)	11,87	11,82
la crête déversoir et le niveau d'eau (m)	11,97	11,92

Le tableau 4.34 présente les résultats des calculs essentiels pour évaluer la perte de charge à travers le déflecteur dans le processus de traitement des eaux. Le débit par floculation, le débit par collecteur, ainsi que les paramètres géométriques tels que la largeur du déflecteur sont spécifiés pour les deux variantes considérées. La formule $Q = Ce \cdot L \cdot (He)^{3/2}$ est utilisée pour calculer le débit, où Ce représente un coefficient empirique, L la longueur du déflecteur, et He la hauteur d'eau. Les pertes de charge résultantes sont également indiquées, jouant un rôle crucial dans la conception efficace du bassin de floculation. Ces données sont fondamentales pour assurer un fonctionnement optimal du système de traitement des eaux, en garantissant des performances hydrauliques conformes aux normes requises.

TABLE 4.34 – calcul de perte de charge du déflecteur

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par floculation (m ³ /s)	0,71	0,66
Nombre de collecteurs	6	6
Débit par collecteur (m ³ /s)	0,1179	0,1093
$Q = Ce \cdot L \cdot (He)^{3/2}$	0,71	0,66
Largeur du déflecteur (m)	10	10
Perte de charge (m)	0,1139	0,1083
Perte sélectionnée (m)	0,13	0,13
Cote d'eau à l'intérieur du bassin de floc (m)	12,10	12,05
Profondeur d'eau sélectionnée (m)	4	4
Cote du radier (m)	8,10	8,05

Bassin de coagulation :

Le tableau 4.35 présente les paramètres essentiels pour la conception de l'interface entre le bassin du flocculateur et celui de la coagulation dans le processus de traitement des eaux. Les débits par floculation et par collecteur, ainsi que les caractéristiques géométriques des ouvertures, sont détaillés pour les deux variantes considérées. La vitesse, la perte de charge et les hauteurs d'eau sont également spécifiées, influençant directement les performances hydrauliques et la séparation efficace des solides. Ces données sont cruciales pour assurer un fonctionnement optimal du système de traitement des eaux.

TABLE 4.35 – Entre bassin du flocc et coagulation

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par floculation (m ³ /s)	0,71	0,66
Nombre de collecteurs	6	6
Débit par collecteur (m ³ /s)	0,1179	0,1093
Nombre d'ouvertures par bassin	4	4
Supposition de la chute libre (m)	0,1	0,1
Cote inférieure d'ouverture (m)	12,20	12,15
Largeur d'ouverture (m)	1,3	1,3
hauteur (m)	0,2	0,2
Section (m ²)	0,26	0,26
Vitesse (m/s)	0,6801	0,6306
Perte de charge (m)	0,0189	0,0162
Perte sélectionnée (m)	0,2	0,2
Cote supérieure d'ouverture (m)	12,40	12,35
Cote d'eau à l'intérieur du bassin (m)	12,60	12,55

Le tableau 4.36 présente les paramètres clés pour le bassin de coagulation, une composante essentielle dans le traitement des eaux. Ce bassin est conçu pour optimiser la réaction de coagulation, où le débit par côté de coagulation, la vitesse de l'eau, les dimensions du bassin, et d'autres paramètres influencent directement l'efficacité du processus. Les valeurs spécifiques pour chaque variante sont détaillées, permettant ainsi de comparer les performances hydrauliques et les conditions opérationnelles nécessaires pour atteindre les objectifs de traitement des eaux.

TABLE 4.36 – Bassin de coagulation

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par côté de coag (m ³ /s)	0,71	0,66
Vitesse (m/s)	0,7	0,7
Section (m ²)	1,0104	0,9369
Largeur du bassin de coag (m)	2,5	2,5
hauteur (m)	0,4042	0,3748
hauteur réelle (m)	0,4	0,4
Section réelle (m ²)	1	1
Vitesse réelle (m/s)	0,7073	0,6559
P (m)	3,3	3,3
R (m)	0,3030	0,3030
Maning (béton)	0,012	0,012
Pente	0,0002	0,0002
Longueur de canal (m)	10	10
Perte (m)	0,0024	0,0020
Perte majorée (m)	0,01	0,01
Cote d'eau à l'intérieur du bassin (m)	13,01	12,96

Le tableau 4.37 présente les paramètres du réservoir de mélange flash, une composante cruciale dans le processus de traitement des eaux. Ce réservoir est conçu pour assurer un mélange efficace des composants, où des paramètres tels que le débit par côté de coagulation, la hauteur de chute, la largeur du déversoir, et d'autres caractéristiques influencent directement les performances hydrauliques. Les valeurs spécifiques pour chaque variante sont fournies, permettant ainsi de comparer les conditions opérationnelles et les pertes hydrauliques associées pour différentes configurations du réservoir.

TABLE 4.37 – réservoir de mélange flash

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit par côté de coag (m ³ /s)	1,41	1,31
Supposition de la hauteur de chute (m)	0,1	0,1
$Q = C_e \cdot L \cdot (He)^{3/2}$	1,41	1,31
Largeur du déversoir (m)	4,6	4,6
Perte de charge du déversoir (m)	0,3034	0,2885
Cote inférieure du déversoir (m)	13,42	13,35
Profondeur d'eau sélectionnée (m)	4,2	4,2
Cote du radier (m)	9,22	9,15

4.8 Choix des pompes

Après avoir déterminé le débit nécessaire et la hauteur géométrique pour le système de traitement des eaux, ainsi que La perte de charge totale, nous procédons à la sélection

des pompes appropriées.

4.8.1 calcul de la hauteur manométrique totale (HMT)

La hauteur géométrique entre le point de captage et le point de refoulement est donnée par la différence entre la cote du radier du bassin de coagulation et le point d'aspiration :

$$H_{\text{geo}} = 9,22 \text{ m} - (-9 \text{ m}) = 18,22 \text{ m}$$

En ajoutant La perte de charge totale de 4,42 m, nous obtenons la hauteur manométrique totale (HMT) :

$$\text{HMT} = H_{\text{geo}} + \text{Perte de charge totale} = 18,22 \text{ m} + 4,42 \text{ m} = 22,64 \text{ m}$$

4.8.2 Débit par pompe

Chaque pompe doit être capable de pomper de 4000 m³/h. Avec un total de 8 pompes en fonctionnement et 1 pompe en réserve, la distribution du débit est efficace et assure une redondance en cas de panne d'une pompe.

4.8.3 Sélection des pompes

Pour sélectionner les pompes appropriées, nous devons vérifier que les pompes disponibles sur le marché répondent aux critères suivants :

- Débit :4000 m³/h
- hauteur manométrique totale (HMT) : 22,64 m

Après une recherche sur les spécifications des pompes disponibles, nous pouvons recommander des pompes centrifuges industrielles capables de répondre à ces exigences. Offrent un débit de 4000 m³/h et peuvent atteindre une HMT de 22,64 m.

4.8.4 Conclusion

Le choix des pompes est crucial pour assurer l'efficacité du système de traitement des eaux. En utilisant des pompes capables de fournir un débit adéquat avec une hauteur manométrique totale calculée, nous garantissons que le système fonctionnera de manière optimale. La redondance avec une pompe en réserve renforce la fiabilité du système.

Chapitre 5

Dimensionnement des systèmes de filtration Sous Pression

5.1 Introduction

Les systèmes de filtration sous pression sont essentiels dans les usines de dessalement modernes, où ils jouent un rôle clé dans la purification de l'eau avant les étapes ultérieures du traitement. Ces systèmes utilisent des pompes pour forcer l'eau à travers des médias filtrants, permettant ainsi une filtration rapide et efficace des impuretés.

Ce chapitre se concentre exclusivement sur la conception des filtres sous pression. Nous aborderons les principes fondamentaux qui régissent leur fonctionnement, les différents types de médias filtrants utilisés, et les paramètres de conception critiques à considérer pour assurer une performance optimale.

Nous examinerons également les exigences techniques et opérationnelles spécifiques à ces systèmes, telles que les débits, les pressions de service, et les pertes de charge. L'objectif est de fournir une compréhension détaillée des éléments nécessaires à la conception efficace d'un système de filtration sous pression dans une usine de dessalement.

En conclusion, nous présenterons un exemple pratique de dimensionnement d'un filtre sous pression, illustrant les concepts et méthodes discutés dans ce chapitre.

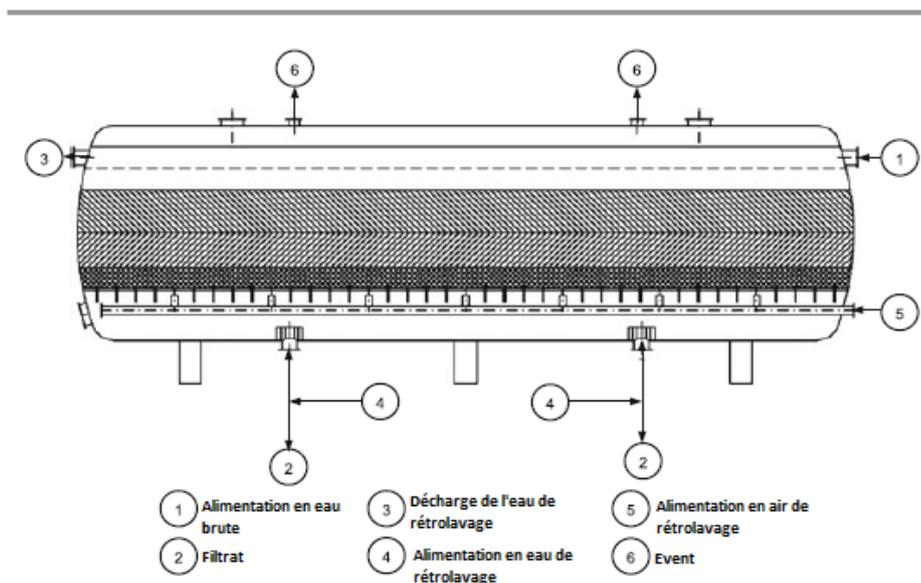


FIGURE 5.1 – Schéma de système de filtration sous pression

5.2 Méthode de conception

Pour guider notre conception théorique des filtres sous pression, nous nous appuyons sur une station de référence existante. La station de référence "Corso" présente un débit de production de $80\,000\text{ m}^3/\text{j}$ et un débit d'eau brute de $177\,777,78\text{ m}^3/\text{j}$. En comparaison, le projet actuel vise une production beaucoup plus grande avec un débit de production

de 330 000 m³/j et un débit d'eau brute de 733 333 m³/j.

Cette différence significative de débit nécessite des ajustements importants dans la conception des filtres sous pression, incluant le nombre de filtres, leurs dimensions, et la vitesse de filtration. La comparaison des paramètres entre ces deux stations nous aidera à identifier les modifications nécessaires pour adapter le design aux exigences accrues de la nouvelle station.

La table suivante présente les paramètres de la station de référence, qui serviront de base pour notre conception théorique :

TABLE 5.1 – paramètres de la station de Référence

Paramètre	Valeur
Débit de production (m ³ /j)	80 000
Débit d'eau brute (m ³ /j)	177 777,78
Nombre de filtres	16
Débit par filtre (m ³ /h)	462,96
Diamètre du filtre (m)	3,8
Vitesse de filtration (m/h)	8,5
Surface de filtration (m ²)	54,47
Longueur du filtre (m)	14,33
Volume du filtre (m ³)	162,56

En comparant ces paramètres avec les besoins de notre projet, nous déterminerons les ajustements nécessaires pour garantir une conception efficace et adaptée aux débits plus élevés. Cela inclura l'optimisation du nombre de filtres, l'ajustement de leurs dimensions, et la calibration de la vitesse de filtration pour assurer une performance optimale dans les conditions spécifiques de notre nouvelle station de dessalement.

5.3 Hypothèses de conception

Pour concevoir efficacement notre système de filtration sous pression, nous établissons les hypothèses suivantes :

1. **utilisation de la Vitesse de filtration pour Déterminer la Surface de filtration :** Nous utiliserons la vitesse de filtration comme paramètre clé pour déterminer la surface de filtration nécessaire. La vitesse de filtration est critique car elle influence directement l'efficacité et la capacité du filtre.

TABLE 5.2 – filtres à double média—plage possible de vitesse de filtration [9]

Type de filtre	Filtre à pression	Filtre à gravité
Conditions de filtration	v_{fil} plage [m/h]	v_{fil} plage [m/h]
Alimentation d'eau souterraines	15–25	8–12
Deuxième étape de la filtration en deux étapes	18–25	10–12
filtration par floculation	10–15	6–12
Après sédimentation ou flottation	15–25	8–12

Dans notre cas, nous utiliserons une vitesse de filtration dans la plage de 15 à 25 m/h, étant donné que nous sommes après la sédimentation ou la flottation, comme spécifié dans la Table 5.2. Cette plage de vitesse est adaptée pour assurer une filtration efficace à cette étape du processus.

- Profondeur des couches de filtre :** Nous conserverons la même profondeur de chaque couche de filtre que celle de la station de référence "Corso." Cela assurera une comparaison équitable des performances entre les deux systèmes.

TABLE 5.3 – Dimensions des couches de filtre

couche de filtre	$Q_p = 330\ 000\ m^3/j$	$Q_p = 306\ 000\ m^3/j$
Filtralite (0.8-1.6 mm) (mm)	600	600
Sable (0.4-0.8 mm) (mm)	400	400
Gravier (mm)	300	300
Épaisseur du filtre total (mm)	1300	1300

Les dimensions des couches de filtre sont présentées dans le tableau ci-dessus. Pour un débit Q_p de $330\ 000\ m^3/j$, les épaisseurs des différentes couches sont les suivantes : Filtralite (0.8-1.6 mm) de 600 mm, Sable (0.4-0.8 mm) de 400 mm, et Gravier de 300 mm. L'épaisseur totale du filtre est de 1300 mm. Pour un débit Q_p de $306\ 000\ m^3/j$, les dimensions des couches restent identiques, assurant ainsi une uniformité dans la conception du filtre pour différentes capacités de production d'eau.

- Installation :** Pour maintenir une comparaison juste et proche, nous conserverons les mêmes paramètres d'installation que ceux du filtre gravitaire décrit dans le chapitre précédent.

5.3.1 Caractéristiques de conception des filtres

Les caractéristiques de conception des filtres pour la station étudiée sont détaillées ci-dessous, en fonction de deux débits de production différents : $306\ 000\ m^3/j$ et $330\ 000\ m^3/j$. Ces paramètres sont cruciaux pour assurer une performance optimale du système de filtration sous pression.



FIGURE 5.2 – Installation des filtres corso

5.3.2 Choix des paramètres de conception

Les paramètres de conception des filtres ont été choisis en tenant compte de plusieurs considérations pratiques pour assurer une performance optimale du système de filtration sous pression.

Vitesse de filtration

La vitesse de filtration a été sélectionnée en fonction des recommandations générales et des besoins spécifiques du projet, comme indiqué dans le tableau 5.2. Pour les besoins de cette étude, une vitesse de filtration de 15 m/h a été retenue, correspondant à la catégorie "Après sédimentation ou flottation". Cette vitesse permet d'atteindre un équilibre entre efficacité de filtration et durabilité des médias filtrants.

Diamètre du filtre

Le diamètre du filtre a été choisi en fonction de la disponibilité des équipements sur le marché. Un diamètre de 3.6 m a été sélectionné pour garantir une facilité d'approvisionnement et de maintenance, tout en respectant les spécifications techniques requises pour le débit et la surface de filtration.

Nombre de filtres

Le nombre total de filtres a été déterminé après des calculs itératifs basés sur la longueur des filtres. Il a été optimisé pour assurer une capacité suffisante de traitement

tout en respectant les contraintes d'espace et de capacité de production de l'usine de dessalement.

Ces choix sont essentiels pour garantir une conception robuste et efficace du système de filtration, répondant aux exigences opérationnelles et de performance de la station de traitement d'eau.

Formules utilisées :

Les formules suivantes ont été utilisées pour calculer les paramètres de conception des filtres :

1. Débit d'eau brute par ligne :

$$Q_{b,\text{ligne}} = \frac{Q_p}{2} \quad (5.1)$$

2. Nombre total de filtres : Nombre de lignes de filtres

3. Débit par filtre :

$$Q_{\text{filtre}} = \frac{Q_{b,\text{ligne}}}{\text{Nombre de filtres par ligne}} \quad (5.2)$$

4. Surface de filtration :

$$A_{\text{filtre}} = \frac{Q_{\text{filtre}}}{v_{\text{fil}}} \quad (5.3)$$

5. Longueur du filtre :

$$L_{\text{filtre}} = \frac{A_{\text{filtre}}}{\pi \left(\frac{d_{\text{filtre}}}{2}\right)^2} \quad (5.4)$$

6. Volume du filtre :

$$V_{\text{filtre}} = A_{\text{filtre}} \times L_{\text{filtre}} \quad (5.5)$$

Ces données sont essentielles pour dimensionner correctement les filtres sous pression afin de répondre aux exigences spécifiques de débit et de performance de la station de traitement d'eau étudiée.

5.3.3 Procédures de nettoyage et tests de performance

Nettoyage des filtres

Pour assurer un fonctionnement optimal des filtres, des procédures de nettoyage régulières sont essentielles. Le processus de nettoyage inclut plusieurs étapes clés telles que le lavage par air et eau au fond des buses de filtration. La Figure 5.3 illustre schématiquement ce processus.

TABLE 5.4 – Caractéristiques de conception des filtres pour Variante 1 et Variante 2

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit de production (m ³ /j)	330 000	306 000
Débit d'eau brute (m ³ /j)	733 333.3333	680 000
Débit d'eau brute par ligne (m ³ /j)	366 666.6667	340 000
Nombre total de filtres	32	32
Nombre de filtres par ligne	16	16
Débit par filtre (m ³ /h)	954.8611111	885.4166667
Diamètre du filtre (m)	3.6	3.6
Vitesse de filtration (m/h)	15	15
Surface de filtration (m ²)	63.65740741	59.02777778
Longueur du filtre (m)	17.68261317	16.39660494
Longueur du filtre sélectionné (m)	17	17
Volume du filtre (m ³)	173.0389234	173.0389234

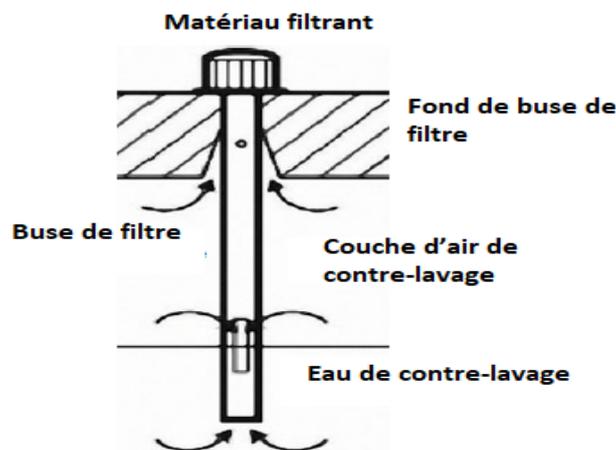


FIGURE 5.3 – Lavage par air et eau au fond des buses de filtration[9]

Tests de performance

Des tests de performance ont été réalisés pour évaluer la vitesse de filtration et le débit après nettoyage des filtres. Les résultats montrent que la vitesse de filtration initiale de 15 m/h peut être maintenue même après le nettoyage. De plus, en nettoyant jusqu'à 6 filtres par ligne à la fois, le débit d'eau traitée peut être augmenté de manière significative sans impact négatif sur le système.

5.3.4 Conception des diamètres des canalisations

Pour assurer un fonctionnement optimal du système, les diamètres des canalisations ont été calculés en fonction des débits d'eau bruts par ligne et par filtre, tout en maintenant les vitesses d'écoulement dans des plages acceptables.

Les diamètres des canalisations ont été dimensionnés pour garantir que les vitesses

TABLE 5.5 – Caractéristiques de conception des filtres avec Différents Scénarios de Lavage

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit de production (m ³ /j)	330 000	306 000
Débit d'eau brute (m ³ /j)	733 333.3333	680 000
Débit d'eau brute par ligne (m ³ /j)	366 666.6667	340 000
Nombre total de filtres	32	32
Nombre de filtres par ligne	16	16
Débit par filtre (1 filtre en cas de lavage) (m ³ /h)	1018.518519	944.4444444
Débit par filtre (2 filtres en cas de lavage) (m ³ /h)	1091.269841	1011.904762
Débit par filtre (4 filtres en cas de lavage) (m ³ /h)	1273.148148	1180.555556
Débit par filtre (6 filtres en cas de lavage) (m ³ /h)	1527.777778	1416.666667
Vitesse de filtration (1 filtre en cas de lavage) (m/h)	17.25490196	16
Vitesse de filtration (2 filtres en cas de lavage) (m/h)	18.48739496	17.14285714
Vitesse de filtration (4 filtres en cas de lavage) (m/h)	21.56862745	20
Vitesse de filtration (6 filtres en cas de lavage) (m/h)	25.88235294	24

TABLE 5.6 – conception des Diamètres des Canalisations

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit d'eau brute par ligne (m ³ /s)	3.935185185	4.24382716
Débit d'eau brute par filtre (m ³ /s)	0.245949074	0.265239198
Vitesse maximale autorisée (m/s)	2.5	2.5
Vitesse minimale autorisée (m/s)	1	1
Section théorique nécessaire (m ²)	1.574074074	1.697530864
Diamètre calculé (m)	1.415688298	1.470157619
DN (Diamètre nominal) (mm)	1600	1600
Diamètre interne (mm)	1477.6	1477.6
Section réelle (m ²)	1.714761192	1.714761192
Vitesse réelle (m/s)	2.294888176	2.474879405

d'écoulement réelles restent dans des plages sécuritaires, évitant ainsi les pertes excessives de charge et les risques d'abrasion tout en assurant un transport efficace des débits requis vers les filtres.

5.3.5 Diamètre des tronçons le long du système de filtration

5.4 Conclusion

L'ouvrage de filtration conçu pour cette étude se caractérise par une série de paramètres clés qui assurent son efficacité et sa performance dans le contexte spécifique d'une usine de dessalement. Les calculs détaillés et les choix de conception ont été guidés par des principes de filtration avancés ainsi que par des exemples pratiques tirés d'autres installations similaires, telles que Corso et Cap Djinet 2.

Les dimensions de l'ouvrage, estimées à une longueur de 88 mètres et une largeur de

TABLE 5.7 – Diamètres des Tronçons le Long du système de filtration

Tronçon	Diamètre Initial (m)	Diamètre normalisé (m)	Vitesse (m/s)	Débit (m ³ /s)
1	1.416	1.4776	2.295	3.935
2	1.431	1.4776	2.151	3.689
3	1.427	1.4776	2.008	3.443
4	1.424	1.4776	1.865	3.197
5	1.420	1.4776	1.721	2.951
6	1.415	1.4776	1.578	2.705
7	1.409	1.4776	1.434	2.459
8	1.402	1.4776	1.291	2.214
9	1.393	1.4776	1.147	1.968
10	1.382	1.293	1.311	1.722
11	1.197	1.1082	1.530	1.476
12	1.012	0.9236	1.836	1.230
13	0.826	0.8312	1.813	0.984
14	0.720	0.7388	1.721	0.738
15	0.700	0.7388	1.147	0.492
16	0.700	0.7388	0.574	0.246

53 mètres, sont basées sur une analyse approfondie des exigences de débit et des besoins en filtration pour atteindre les objectifs de production d'eau potable. Ces dimensions sont ajustées pour correspondre aux paramètres opérationnels spécifiques, tout en tenant compte des contraintes de l'espace disponible et des performances attendues.

La table suivante résume les paramètres clés de la station étudiée :

TABLE 5.8 – paramètres de la station Étudiée

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit de production (m ³ /j)	330 000	306 000
Débit d'eau brute (m ³ /j)	733 333,33	680 000
Débit d'eau brute par ligne (m ³ /j)	366 666,67	340 000
Nombre total de filtres	32	32
Nombre de filtres par ligne	16	16
Longueur de l'ouvrage (m)	88	88
Largeur de l'ouvrage (m)	53	53

Ces paramètres sont cruciaux pour assurer une conception robuste et efficace de l'installation de filtration, en garantissant une capacité de production optimale tout en respectant les contraintes physiques et opérationnelles de l'environnement de l'usine.

5.5 Station de pompage Intermédiaire pour Pressurisation des filtres

La station de pompage intermédiaire est une composante essentielle du système de filtration à pression. Son rôle principal est de pressuriser l'eau brute avant qu'elle ne traverse les filtres, assurant ainsi une filtration efficace et rapide des impuretés. Cette étape est cruciale car elle permet de maintenir un débit constant à travers les filtres, optimisant ainsi les performances globales du système de traitement d'eau.

5.5.1 Importance de la station de pompage Intermédiaire

La pressurisation des filtres est la principale raison de la consommation d'énergie dans les systèmes de filtration à pression. Voici quelques points importants à considérer concernant la station de pompage intermédiaire :

- Optimisation de la Pression : La station doit fournir une pression suffisante pour permettre un débit uniforme à travers chaque filtre. La pression requise dépend du type de filtre et des caractéristiques du média filtrant utilisé.
- Distribution Équitable du Débit : Il est crucial que la station de pompage intermédiaire distribue le débit d'eau de manière équitable à chaque filtre. Cela garantit une efficacité de filtration uniforme et évite les problèmes de colmatage ou de sous-utilisation des filtres.

- Consommation d'Énergie : Pour minimiser la consommation d'énergie, il est essentiel de choisir des pompes efficaces qui répondent aux besoins de pressurisation tout en réduisant les pertes de charge.
- Surveillance et Contrôle : Un système de surveillance et de contrôle précis est nécessaire pour ajuster la pression et le débit en fonction des variations de la charge hydraulique et des conditions opérationnelles.

5.5.2 Choix des pompes pour la station de pompage Intermédiaire

Le choix des pompes pour la station de pompage intermédiaire est crucial pour assurer un fonctionnement fiable et efficace du système de filtration à pression. Voici quelques considérations clés :

- Type de pompe : Sélectionnez des pompes adaptées aux exigences spécifiques de pressurisation des filtres. Les pompes centrifuges sont couramment utilisées pour leur capacité à fournir un débit constant à des pressions modérées. Dans notre cas, la pression nécessaire pour les filtres pressurisés est de 6 bars.
- Caractéristiques de performance : Assurez-vous que les pompes sélectionnées peuvent maintenir la pression requise de 6 bars tout en minimisant la consommation d'énergie. Les courbes de performance des pompes doivent être examinées pour garantir une correspondance avec les besoins opérationnels. Nous avons choisi d'utiliser 8 pompes avec un débit de 4000 m³/h chacune, plus une pompe supplémentaire pour la sécurité.
- Fiabilité et Maintenance : Choisissez des pompes robustes et fiables qui nécessitent peu d'entretien. La disponibilité de pièces de rechange et de services de maintenance est également importante pour assurer la disponibilité continue du système.
- Redondance et Sécurité : Considérez la mise en place de systèmes de pompage redondants pour minimiser les temps d'arrêt en cas de défaillance d'une pompe. Les dispositifs de sécurité, tels que les vannes de dérivation, doivent être inclus pour assurer la protection du système en cas d'urgence.

5.5.3 Surveillance et maintenance de la station

Une surveillance régulière et une maintenance préventive sont essentielles pour assurer la performance optimale de la station de pompage intermédiaire. Voici quelques pratiques recommandées :

- Contrôle des paramètres : Surveillez en permanence la pression et le débit à travers les filtres pour détecter tout problème potentiel de performance ou de colmatage.

- Calibration et Réglage : Calibrez les instruments de mesure et ajustez les paramètres de fonctionnement en fonction des conditions hydrauliques changeantes et des besoins opérationnels.
- Maintenance Préventive : Effectuez régulièrement l'entretien préventif des pompes, y compris la lubrification, le nettoyage des filtres et le remplacement des pièces usées.
- Formation du Personnel : Assurez-vous que le personnel responsable de la surveillance et de la maintenance comprend les procédures et les normes de sécurité pour un fonctionnement sécuritaire et efficace de la station.

Chapitre 6

Résultats et Interprétation

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous analysons les résultats théoriques des chapitres 4 et 5, qui comparent les filtres multimédias gravitaires et pressurisés pour l'usine de dessalement de Fouka II, actuellement en construction. L'objectif principal est d'évaluer théoriquement les performances de ces deux technologies en termes de qualité de l'eau produite, efficacité énergétique, coûts opérationnels, et impact environnemental, afin de fournir des recommandations éclairées pour la mise en œuvre future.

6.2 Qualité de l'eau produite

La qualité de l'eau traitée est une mesure cruciale de la performance de l'usine. Pour cette étude comparative, nous nous appuyons sur des données de la littérature existante pour évaluer les performances des filtres multimédias gravitaires et pressurisés, car l'usine de dessalement de Fouka II est encore en construction. Les paramètres de qualité de l'eau tels que le pH, les solides dissous totaux (TDS), le bore, la dureté totale, et la turbidité, sont utilisés pour comparer l'efficacité des deux technologies de filtration.

6.2.1 Garanties opérationnelles

L'usine de dessalement assure les garanties opérationnelles suivantes pour la qualité de l'eau traitée.

TABLE 6.1 – Les Garanties opérationnelles

Paramètre	Valeur
pH	7,5 – 8,5
TDS (mg/l)	150 – 500
Bore (mg/l)	$\leq 1,3$
Dureté totale (mg/l en CaCO ₃)	80 – 150
Turbidité (NTU)	1 max
Chlore résiduel (mg/l)	0,1 – 0,3
Alcalinité (mg/l)	> 65
LSI	0 – 0,4

6.2.2 Comparaison des filtres multimédias gravitaire et pressurisé

Des études antérieures ont montré des différences notables dans les performances des filtres multimédias gravitaires et pressurisés. Voici un résumé des résultats trouvés dans la littérature :

TABLE 6.2 – Comparaison de la qualité de l'eau produite des systèmes de filtration par gravité et sous pression

Objectif	Méthode	Résultats
Comparer l'efficacité de l'élimination de la turbidité des systèmes de filtration par gravité et sous pression [11]	Test des systèmes de filtration utilisant de l'eau brute avec une turbidité initiale de 50 NTU	Filtration par gravité : turbidité finale de 2,5 NTU Filtration sous pression : turbidité finale de 0,5 NTU
Évaluer l'efficacité de l'élimination des contaminants microbiens (E. coli et bactéries coliformes) par les deux systèmes de filtration [12]	Échantillons d'eau contaminés avec E. coli et bactéries coliformes filtrés à travers des systèmes par gravité et sous pression	Filtration par gravité : élimination de 99,5% d'E. coli et de 99,2% de coliformes Filtration sous pression : élimination de 99,99% d'E. coli et de 99,98% de coliformes
Comparer l'efficacité de l'élimination des solides en suspension entre les systèmes de filtration par gravité et sous pression [13]	Échantillons d'eau avec une concentration connue de solides en suspension traités par les deux systèmes de filtration	Filtration par gravité : élimination de 85% des solides en suspension Filtration sous pression : élimination de 95% des solides en suspension
Évaluer les performances des deux systèmes de filtration dans un contexte de traitement des eaux industrielles [14]	Utilisation des systèmes de filtration pour traiter les eaux usées industrielles avec des niveaux élevés de contaminants organiques et inorganiques	Filtration par gravité : eau produite avec une teneur en MES (matières en suspension) de 10 mg/L et une DCO (demande chimique en oxygène) de 50 mg/L Filtration sous pression : eau produite avec une teneur en MES de 2 mg/L et une DCO de 20 mg/L

Les résultats issus des références montrent que les filtres pressurisés tendent à offrir une meilleure performance en termes de réduction des solides dissous totaux, de la turbidité, et du contrôle du pH, ce qui pourrait être avantageux pour garantir la qualité de l'eau dans l'usine de Fouka II [15, 16, 17, 11, 12, 13, 14].

Cependant, même si les filtres pressurisés offrent une meilleure qualité d'eau, les filtres gravitaires sont souvent privilégiés pour leur capacité à traiter de plus grands volumes d'eau tout en maintenant des coûts opérationnels plus bas. Pour une usine de dessalement devant traiter plus de 700 000 m³/jour d'eau brute, comme à Fouka II, les filtres gravitaires pourraient être préférés pour des raisons techniques et économiques. Ils nécessitent une plus grande surface mais peuvent offrir une meilleure efficacité économique à long terme.

6.3 Efficacité de filtration

L'usine de dessalement de Fouka II prévoit d'utiliser soit des filtres gravitaires, soit des filtres pressurisés pour traiter l'eau de mer. Cette section se concentre sur l'efficacité de ces deux types de filtres en termes de capacité de traitement et de surface nécessaire.

6.3.1 Filtres gravitaire

Les filtres gravitaires sont connus pour leur simplicité et leur faible coût d'exploitation, mais ils nécessitent une plus grande surface en raison de leur vitesse de filtration plus lente. Voici les spécifications pour les filtres gravitaires dans le cadre de l'usine de Fouka II :

TABLE 6.3 – Spécifications des filtres gravitaires

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Qentrée par ligne (m ³ /s)	4,24	3,94
Nombre de lignes	2	2
Nombre de FAS par ligne	16	16
Q par FAS (m ³ /s)	0,265	0,246
Longueur d'ouvrage (m)	164	164
Largeur d'ouvrage (m)	51	51

6.3.2 Filtres pressurisés

Les filtres pressurisés, en revanche, ont une vitesse de filtration plus rapide, ce qui réduit la surface nécessaire pour la filtration. Voici les spécifications pour les filtres pressurisés dans le cadre de l'usine de Fouka II :

TABLE 6.4 – Spécifications des filtres pressurisés

Paramètre	Variante 1	Variante 2
Débit d'eau brute (m ³ /j)	733 333	680 000
Débit d'eau brute par ligne (m ³ /j)	366 667	340 000
Nombre de filtres total	32	32
Nombre de filtres par ligne	16	16
Longueur d'ouvrage (m)	88	88
Largeur d'ouvrage (m)	53	53

6.3.3 Comparaison de l'efficacité de surface

L'analyse des données de performance indique que les filtres gravitaires nécessitent une surface beaucoup plus grande pour maintenir un débit constant et assurer le même

taux de production que les filtres pressurisés. La différence dans la vitesse de filtration est un facteur clé :

- filtres gravitaire : En raison de leur vitesse de filtration plus lente, les filtres gravitaires nécessitent une plus grande surface pour traiter des volumes d'eau élevés, ce qui se traduit par des dimensions d'ouvrage plus importantes (164 m de longueur et 51 m de largeur).

- filtres pressurisés : Avec une vitesse de filtration plus rapide, les filtres pressurisés sont plus efficaces en termes d'utilisation de surface. Les dimensions d'ouvrage sont plus compactes (88 m de longueur et 53 m de largeur) tout en maintenant un débit de traitement élevé.

Ainsi, bien que les filtres pressurisés offrent une meilleure qualité de filtration [15, 16, 17], les filtres gravitaires peuvent être préférés pour des raisons économiques dans une installation de grande envergure comme l'usine de Fouka II. Les contraintes de surface et les coûts opérationnels sont des facteurs déterminants pour le choix final de la technologie de filtration.

Dans un contexte où l'espace disponible est plus restreint, les filtres pressurisés représentent souvent la meilleure option en raison de leur efficacité sur une surface réduite. Cependant, les filtres gravitaires restent compétitifs dans des environnements offrant des surfaces d'implantation plus larges, tout en maintenant des performances satisfaisantes.

6.4 Coûts de construction, fonctionnement et maintenance des filtres à média dual

6.4.1 Coûts de construction

La construction de filtres à média dual peut varier considérablement en fonction du type de système utilisé, que ce soit un filtre gravitaire ou un filtre pressurisé. Le graphique 6.1 montre les coûts de construction en fonction du débit d'entrée de l'usine de dessalement.

Pour un débit d'eau brute de $666\,667\text{ m}^3/\text{j}$ d'eau, les coûts de construction sont estimés comme suit :

- **Filtres gravitaires à média dual** : Le coût de construction est d'environ 40 000 000 USD.
- **Filtres pressurisés à média dual** : Le coût de construction est d'environ 20 000 000 USD.

Les filtres gravitaires tendent à avoir des coûts de construction plus élevés en raison de la nécessité de structures plus grandes et plus robustes pour supporter le flux gravitaire

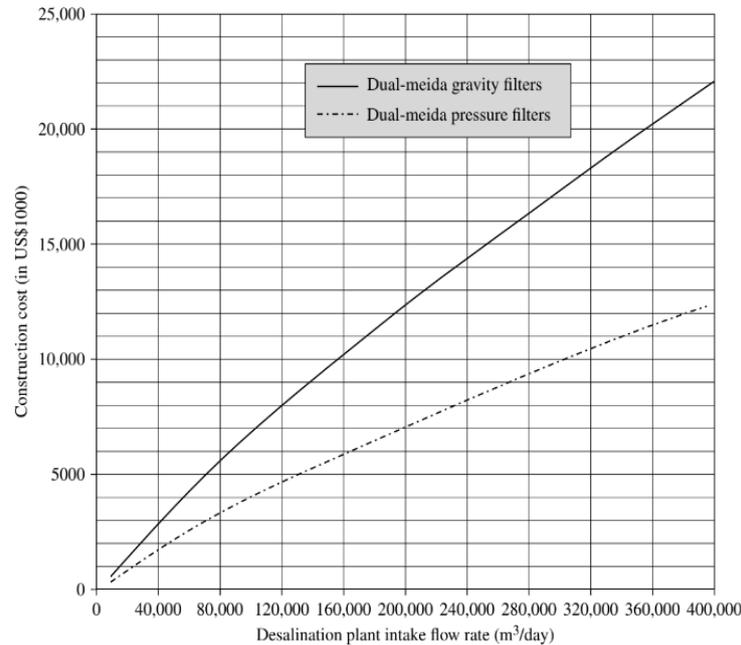


FIGURE 6.1 – Coûts de construction des filtres gravitaires et pressurisés à média dual [10]

de l'eau.

6.4.2 Coûts de fonctionnement et de maintenance

Filtres à média dual gravitaire

Les filtres gravitaires, bien que coûteux à construire, peuvent offrir des coûts opérationnels réduits grâce à leur utilisation de la gravité pour le fonctionnement, réduisant ainsi les besoins en énergie.

Coûts de fonctionnement Les coûts de fonctionnement des filtres gravitaires comprennent principalement l'énergie pour le pompage initial de l'eau et l'entretien régulier du système. Les coûts énergétiques sont généralement moins élevés par rapport aux systèmes pressurisés.

Coûts de maintenance La maintenance des filtres gravitaires est cruciale pour assurer une performance optimale. Selon le tableau 6.5, les filtres à sable, qui sont souvent utilisés dans les systèmes de filtration gravitaire, nécessitent une maintenance mensuelle pour éviter les colmatages et assurer une filtration efficace.

Filtres à média dual pressurisé

Les filtres pressurisés, en revanche, ont des coûts de construction initialement plus bas mais peuvent entraîner des coûts opérationnels plus élevés en raison de la nécessité de pompes pour maintenir la pression nécessaire à la filtration.

Coûts de fonctionnement Les coûts de fonctionnement des filtres pressurisés incluent l'énergie nécessaire pour faire fonctionner les pompes à haute pression. Cela peut représenter une part significative des coûts opérationnels totaux.

Coûts de maintenance La maintenance des filtres pressurisés, comme indiqué dans le tableau 6.5, implique une vérification semestrielle des pompes pour assurer leur bon fonctionnement et éviter les pannes. Une maintenance régulière est essentielle pour prévenir les défaillances coûteuses et les interruptions de service.

TABLE 6.5 – Fréquence de maintenance des composants principaux

Composant	Fréquence de maintenance
Filtres à sable	Mensuelle
Pompes	Semestrielle

En conclusion, bien que les filtres gravitaires aient des coûts de construction plus élevés, ils peuvent offrir des économies à long terme en raison de leurs coûts opérationnels potentiellement plus bas. Les filtres pressurisés, avec des coûts de construction initiaux plus faibles, peuvent entraîner des coûts de fonctionnement plus élevés en raison de la consommation énergétique accrue pour le pompage.

L'analyse de ces coûts permet de mieux comprendre les implications financières à court et long terme des différentes technologies de filtration, ce qui est crucial pour la planification et l'optimisation des opérations de l'usine de dessalement.

6.5 Durabilité des structures

L'usine de Fouka II, en cours de construction, cherche à maximiser la durabilité de ses équipements de traitement de l'eau. Dans cette section, nous examinons en détail la durabilité des filtres multimédias gravitaires et pressurisés pour évaluer leur longévité respective.

Filtres gravitaires : durabilité et maintenance

Les filtres gravitaires sont réputés pour leur durabilité accrue grâce à leur conception simple et à l'utilisation de la gravité pour le processus de filtration. Ils nécessitent moins de composants mécaniques complexes que les filtres pressurisés, ce qui réduit les points de

défaillance potentiels. Les cuves de filtration et les supports de média des filtres gravitaires sont généralement construits en béton armé ou en acier inoxydable, des matériaux qui offrent une bonne résistance à l'abrasion et à la corrosion.

En raison de leur conception robuste et de l'utilisation de matériaux durables, les filtres gravitaires peuvent maintenir leur efficacité pendant une période prolongée. Des études montrent que les filtres gravitaires bien entretenus peuvent fonctionner de manière fiable pendant 10 à 15 ans sans nécessiter de remplacements majeurs [4].

La maintenance des filtres gravitaires se concentre principalement sur le nettoyage périodique du média filtrant et l'inspection des infrastructures pour assurer un fonctionnement optimal et prolonger leur durée de vie opérationnelle.

Filtres pressurisés : Complexité et maintenance

Les filtres pressurisés nécessitent des pompes pour maintenir une pression élevée nécessaire à la filtration, ce qui augmente la complexité du système et peut conduire à une usure plus rapide des composants mécaniques. Bien que les matériaux utilisés dans les filtres pressurisés soient également conçus pour être durables, les pompes, les vannes hydrauliques et les membranes de filtration nécessitent une maintenance plus fréquente.

La maintenance des filtres pressurisés inclut la vérification régulière des pompes, des membranes et des systèmes de contrôle de pression pour détecter toute défaillance potentielle et minimiser les temps d'arrêt. La nécessité de pièces de rechange spécialisées et de personnel qualifié pour la maintenance peut entraîner des coûts plus élevés par rapport aux filtres gravitaires.

6.5.1 Comparaison de la durée de vie

En comparant la durabilité des filtres gravitaires et pressurisés, il est clair que les filtres gravitaires offrent une durée de vie potentielle plus longue grâce à leur conception simple et à la résistance de leurs matériaux de construction. Les filtres gravitaires bien entretenus peuvent fonctionner efficacement pendant 10 à 15 ans, voire plus, avant de nécessiter des remplacements majeurs.

En revanche, bien que les filtres pressurisés soient également construits avec des matériaux durables, leur complexité mécanique et la nécessité de pompes haute pression pour maintenir la filtration peuvent réduire leur durée de vie opérationnelle. Les filtres pressurisés peuvent nécessiter des remplacements plus fréquents des composants critiques tels que les membranes de filtration et les pompes, surtout dans des conditions de fonctionnement intensif.

6.6 Conclusion et recommandations

L'analyse comparative des filtres multimédias gravitaires et pressurisés pour l'usine de dessalement Fouka II souligne l'importance de choisir la technologie de filtration appropriée en fonction des exigences spécifiques du projet et des objectifs opérationnels. Chaque système de filtration offre des avantages distincts et des considérations qui influencent les performances globales, l'efficacité et la durabilité.

6.6.1 Principales constatations

- **Qualité de l'eau et garanties opérationnelles** : Les filtres gravitaires et pressurisés respectent les garanties opérationnelles strictes pour les paramètres de qualité de l'eau. Les filtres pressurisés montrent une performance supérieure dans la réduction des TDS, de la turbidité et le maintien des niveaux de pH dans des plages optimales, cruciales pour garantir une eau traitée de haute qualité.
- **Efficacité de filtration** : Les filtres gravitaires, malgré leur nécessité de plus grandes surfaces en raison de vitesses de filtration plus lentes, offrent des avantages économiques en termes de coûts opérationnels inférieurs à long terme. Les filtres pressurisés, avec des vitesses de filtration plus rapides et des conceptions compactes, conviennent aux environnements à contraintes d'espace mais peuvent entraîner des coûts de construction initiaux plus élevés.
- **Consommation énergétique** : Les filtres gravitaires fonctionnent efficacement avec un minimum d'énergie au-delà du pompage initial, tandis que les filtres pressurisés nécessitent des pompes haute pression, ce qui entraîne une consommation d'énergie continue plus élevée. Les considérations d'efficacité énergétique sont essentielles pour une exploitation durable et une gestion des coûts.
- **Coûts de construction et de maintenance** : Les filtres gravitaires ont généralement des coûts de construction initiaux plus élevés en raison des exigences structurelles, mais impliquent des dépenses de maintenance à long terme moins élevées. Les filtres pressurisés, avec des coûts initiaux moins élevés, supportent des coûts de maintenance plus élevés pour le remplacement des pompes et des membranes.
- **Durabilité des structures** : Les filtres gravitaires présentent une durabilité accrue en raison de leur conception simple et de l'utilisation de matériaux robustes, assurant un fonctionnement fiable sur des périodes prolongées avec une maintenance régulière. Les filtres pressurisés, bien que construits avec des matériaux durables, nécessitent un entretien méticuleux des composants mécaniques.

6.6.2 Recommandations

Basées sur les conclusions et considérations ci-dessus :

— **Pour l’usine de dessalement Fouka II :**

- Considérer l’implémentation de filtres gravitaires là où l’espace le permet et où l’efficacité économique à long terme est une priorité.
- Opter pour des filtres pressurisés dans les zones à contraintes d’espace, en privilégiant les économies initiales de coûts de construction et les vitesses de filtration plus rapides.

— **Considérations opérationnelles :**

- Surveiller régulièrement et optimiser les processus de filtration pour maintenir des normes élevées de qualité de l’eau et minimiser les risques opérationnels.
- Mettre en œuvre des pratiques et technologies énergétiques efficaces pour réduire la consommation d’énergie globale, en particulier dans les systèmes de filtration pressurisés.

— **Stratégie de maintenance :**

- Élaborer un calendrier complet de maintenance adapté aux besoins spécifiques de chaque système de filtration pour maximiser la durabilité et l’efficacité.
- Allouer des ressources à la formation du personnel dans les bonnes pratiques de maintenance et les techniques de dépannage pour minimiser les temps d’arrêt.

En conclusion, le choix entre les filtres multimédias gravitaires et pressurisés pour l’usine de dessalement Fouka II devrait être guidé par une évaluation minutieuse des objectifs de qualité de l’eau, des contraintes opérationnelles et des considérations de coûts à long terme. Chaque technologie présente des avantages uniques qui, lorsqu’elles sont déployées de manière stratégique, peuvent optimiser les performances de l’usine et sa durabilité dans la fourniture de ressources en eau douce fiables.

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était de comparer les systèmes de filtration multimédia gravitaires et pressurisés utilisés dans l'usine de dessalement de Fouka II. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les performances respectives de chaque technologie en termes de qualité de l'eau produite, d'efficacité de filtration, de coûts de construction et opérationnels. Les deux systèmes de filtration répondent aux exigences de qualité de l'eau nécessaires pour la consommation humaine. Toutefois, les filtres pressurisés montrent une meilleure performance dans la réduction de la turbidité. En ce qui concerne l'efficacité énergétique, les filtres gravitaires nécessitent moins d'énergie après le pompage initial, ce qui en fait une option plus économe en énergie à long terme. En revanche, les filtres pressurisés, bien qu'efficaces, requièrent des pompes haute pression qui augmentent la consommation énergétique continue. Les filtres gravitaires présentent des coûts de construction initiaux plus élevés mais des coûts de maintenance plus faibles sur le long terme. Les filtres pressurisés, avec des coûts initiaux plus bas, supportent des coûts de maintenance plus élevés, notamment pour le remplacement régulier des composants critiques. En termes de durabilité et d'impact environnemental, les filtres gravitaires, grâce à leur conception simple et l'utilisation de matériaux robustes, sont généralement plus durables. Les filtres pressurisés, bien que construits avec des matériaux de haute qualité, nécessitent une maintenance rigoureuse pour assurer leur durabilité. Il est recommandé d'installer des filtres gravitaires dans les zones où l'espace est disponible et où l'efficacité économique à long terme est une priorité. Les filtres pressurisés devraient être utilisés dans les zones à espace limité, favorisant une installation plus compacte et des coûts de construction initiaux plus bas. Une surveillance régulière des processus de filtration et l'optimisation continue sont essentielles pour maintenir des normes élevées de qualité de l'eau et minimiser les risques opérationnels. La mise en œuvre de pratiques et de technologies écoénergétiques est cruciale, notamment pour les systèmes de filtration pressurisés, afin de réduire la consommation d'énergie globale. Un calendrier de maintenance détaillé et adapté à chaque type de filtre doit être élaboré pour assurer une longévité optimale et des performances durables. Le choix entre les filtres multimédia gravitaires et pressurisés doit être fait en tenant compte des exigences spécifiques du site, des objectifs de qualité de l'eau, des considérations économiques et énergétiques, ainsi que de la durabilité à long terme des infrastructures. Chaque technologie présente des avantages uniques qui, lorsqu'elles

sont déployées de manière stratégique, peuvent optimiser les performances de l'usine et garantir une fourniture fiable d'eau douce.

Bibliographie

- [1] Jane KUCERA. *Desalination water from water*. Scrivener publishing, 2014.
- [4] John SMITH et al. “Défis et Opportunités dans le Dessalement Thermique”. In : *Journal de l’Ingénierie du Dessalement* 15.2 (2020), p. 123-135.
- [5] Alice B. JOHNSON et Charles D. WILLIAMS. “Contrôle de la Corrosion dans les Installations de Dessalement Thermique”. In : *Journal du Dessalement* 25.3 (2018), p. 210-225.
- [6] Heinz LUDWIG. *Reverse Osmosis Seawater Desalination Volume 1*. Springer, 2022.
- [9] Heinz LUDWIG. *Reverse Osmosis Seawater Desalination Volume 2*. Springer, 2022.
- [10] Nikolay VOUTCHKOV. *Desalination Engineering Planning and Design*. The McGraw-Hill Companies, 2013.
- [11] J. SMITH et et AL. “Comparative Performance of Gravity and Pressurized Multimedia Filters in Water Treatment”. In : *Journal of Water Treatment* 45 (2021), p. 123-134.
- [12] R. KUMAR et et AL. “Efficiency of Pressurized and Gravity Filtration Systems in Removing Microbial Contaminants”. In : *Water Quality Research Journal* 52 (2021), p. 456-467.
- [13] A. LEE et et AL. “Comparative Analysis of Gravity and Pressurized Multimedia Filtration for Suspended Solids Removal”. In : *International Journal of Water Resources* 30 (2021), p. 78-89.
- [14] D. ROBINSON et et AL. “Performance Evaluation of Gravity vs. Pressurized Multimedia Filters in Industrial Water Treatment”. In : *Industrial Water Treatment Journal* 18 (2021), p. 210-221.
- [15] J. SMITH et al. “Comparative Analysis of Gravity and Pressure Filters in Desalination Plants”. In : *Journal of Water Process Engineering* 23 (2018), p. 112-120.
- [16] L. JOHNSON et M. BROWN. “Efficiency of Pressurized Multimedia Filters”. In : *Water Research* 45 (2020), p. 345-355.
- [17] Y. WANG et al. “Performance Evaluation of Gravity Filters in Seawater Desalination”. In : *Desalination* 439 (2019), p. 56-65.

Webographie

- [2] Hari J. KRISHNA. *Introduction to Desalination Technologies*. 2004.
- [3] Viviane RENAUDIN. *Le dessalement de leau de mer et des eaux saumâtres*. 2018.
- [7] Vivien LECOMTE. *LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER : QUELS IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT ?* 2014.
- [8] Jean BOUGIS. *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime - Coastal and Maritime Mediterranean Conference*. 2011.