

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE BLIDA 1 -

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité/ Génie chimique

Thème

***Simulation et dimensionnement d'une unité de nanofiltration
comme extension de la station de traitement de l'eau du
barrage TCHY-HAF***

Présenté par

BOUNEBAL Mourad
MORSLI Abdelfettah

Encadré par

Pr.Wahib NACEUR

Co-promoteur

M.Moundher HADJI

Année Universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah tout-puissant qui nous a guidés tout au long de nos vies, qui nous a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles, qui nous a permis d'achever ce travail et de pouvoir le mettre entre vos mains aujourd'hui.

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur Monsieur **Mohamed Waheb NACEUR** professeur à l'Université Blida 1 qui en confiance en nous et il nous a permis de travailler sur un sujet d'étude et qu'il a mis à notre disposition tous les moyens et les ressources nécessaires à sa réalisation et pour ses précieux conseils et ses remarques pertinentes qui nous ont été d'une grande utilité, pour son dévouement, sa patience, sa générosité et sa disponibilité. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de notre plus profonde reconnaissance et de notre plus profond respect.*

Nous remercions fortement nos parents, nos sœurs, nos frères et nos proches qui s'investissent pour nous.

Nous remercions par ailleurs vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à la soutenance.

*Nous remercions profondément Monsieur **Dr.HADJI Moundher**, enseignant à l'université Blida 1 pour ses précieux conseils et ses soutiens tout au long du parcours de nos études.*

*Nous remercions également **M. MESSAOUDI Karim** et **M.OUAGOURI Cherif** (ingénieurs chargé de la mise en service de l'usine) pour nous avoir facilité l'accès à l'usine et son accompagnement - tout au long de la période.*

*J'exprime ma gratitude à notre chef de département Génie des procédés **Mme BOUTEMAK Khalida**, et à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation depuis l'école primaire jusqu'aux études universitaires.*

Enfin, nous exprimons nos vifs remerciements à toutes celles et/ou ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cet mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A mon père, qu'ALLAH le sauve m'ont soutenu, encouragé

A ma mère, ma raison de vivre, qu'ALLAH la sauve

A tous mes frères, Mohamed, Abdel Hadi

À mes tendre sœurs et leurs mari Ibrahim et

Abdelkader et leurs enfants.

A mon binôme Mourad

A mes amis Abdel Raouf, Sohaib, Mohamed,

Abdelaziz, Zakaria, Abdeslam, Oussama,

Nabil, Abdelhak...

A tous ceux qui me sont chers.

MORSLI Abdelfettah

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A mon père, qu'ALLAH le sauve m'ont soutenu, encouragé

A ma mère, ma raison de vivre, qu'ALLAH la sauve

A tous mes frères, Rachid, Nabil, Othmane

À ma tendre soeur et son mari et leurs enfants

A mon binôme Abdelfettah

À mon ami Nadjib RAIS et tous mes amis

A tous ceux qui me sont chers

BOUNEBAL Mourad

Résumé

L'analyse d'eau de barrage du Tichy-haf a des caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques qui ne présentent pas une totale conformité aux normes algériennes des eaux destinées à la consommation humaine. La teneur des sulfates et la dureté enregistrent des valeurs supérieures aux valeurs admissibles. Après examen des résultats d'analyse AMENHYD s'engage à présenter la solution technique permettant à la station de traitement des eaux du barrage projetée de produire une eau conforme aux normes algériennes. Il s'agit du maintien de la solution contractuelle suivi d'une étape de nano filtration (aération - coagulation - floculation - décantation- Ultrafiltration – Nano filtration) avec toutes les améliorations jugées nécessaires au niveau de l'ancienne station.

L'objectif premier de cette étude est d'implémenter un système membranaire de nanofiltration répondant aux exigences contractuelles. Le choix d'une membrane de nanofiltration permettant un abaissement de la concentration en sulfate et de la dureté totale en choisissant la configuration du système la plus approprié du point de vue de l'efficacité de la sélectivité, des flux de perméat nécessaires, du recyclage du concentrât et de l'énergie spécifique la plus faible. La simulation effectuée par deux outils mis à notre disposition par les deux leaders mondiaux sur le marché membranaire à savoir ; HYDRANAUTIC et DOW. Les résultats de la simulation ont montré que pour une configuration sans recyclage du concentrât, le nombre de 10 trains, composé chacun de 3 étages de 70 tubes de pressions, chacun de ces tubes de pression supporte 6 modules membranaires qui sont nécessaires pour répondre aux termes du contrat tant sur la quantité que sur la qualité. En revanche, les rapports de la simulation révèlent de meilleures performances de la membrane NF270-400/34i (DOW) par rapport à la membrane de nanofiltration HYDRANAUTIC ESNA1-LF2-LD, bien que celle-ci réponde parfaitement aux exigences du client.

Par ailleurs, les résultats obtenus pour une configuration à deux étages avec un débit de concentrât en recirculation d'environ 20%, donnent des résultats relativement comparables à la variante 3 étages sans recirculation du point de vue de la sélectivité, avec une énergie spécifique plus élevée. A ce stade la comparaison des résultats des simulations effectuées révèle que le meilleur choix est celui de la membrane NF270-400/34i (DOW) pour une solution optimale.

Mots clés : Traitement conventionnel, Ultrafiltration, Nanofiltration, colmatage.

ملخص

يتميز تحليل مياه سد تيشي حاف بخصائص فيزيائية وكيميائية وبكتريولوجية لا تتوافق تمامًا مع المعايير الجزائرية للمياه المخصصة للاستهلاك البشري. محتوى الكبريتات والصلابة تسجل قيم أعلى من القيم المسموح بها. بعد فحص نتائج التحليل، تتعهد أمنهايد بتقديم الحل التقني الذي يسمح لمحطة معالجة المياه في السد المقترح بإنتاج المياه التي تلبى المواصفات الجزائرية. يتضمن ذلك الحفاظ على الحل التعاقدية متبوعًا بخطوة ترشيح نانوي (تهوية - تخثر - تلبد - ترسيب - ترشيح فائق - ترشيح نانو) مع جميع التحسينات التي تعتبر ضرورية على مستوى المحطة القديمة. الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو تنفيذ نظام غشاء ترشيح نانوي يلبي المتطلبات التعاقدية. اختيار غشاء ترشيح نانوي يسمح بتخفيض تركيز الكبريتات والصلابة الكلية عن طريق اختيار أنسب تكوين للنظام من وجهة نظر الكفاءة الانتقائية، وتدفق النفاذية اللازمة، وإعادة تدوير المركز والصلابة بأدنى طاقة محددة. المحاكاة التي يتم إجراؤها بواسطة أداتين تم توفيرهما لنا من قبل اثنين من الرواد العالميين في سوق الأغشية، وهما؛ الهيدرونوتيك وداو. أظهرت نتائج المحاكاة أنه بالنسبة للتكوين بدون إعادة تدوير المركز، فإن عدد 10 قطرات، كل منها يتكون من 3 مراحل من 70 أنبوب ضغط، كل من أنابيب الضغط هذه تدعم 6 وحدات غشائية ضرورية للوفاء بشروط العقد من حيث الكمية والنوعية. في المقابل، تُظهر تقارير المحاكاة أداءً أفضل للغشاء (DOW) NF270-400 / 34i مقارنةً بغشاء الترشيح النانوي HYDRANAUTIC ESNA1-LF2-LD، على الرغم من أنه يلبي تمامًا متطلبات العميل. علاوة على ذلك، فإن النتائج التي تم الحصول عليها التي تتكون من مرحلتين مع معدل تدفق تركيز إعادة التدوير يبلغ حوالي 20٪، تعطي نتائج مماثلة نسبيًا للمتغير ثلاثي المراحل دون إعادة تدوير من وجهة نظر انتقائية، مع طاقة أكثر تحديدًا. في هذه المرحلة، تكشف مقارنة نتائج عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها أن أفضل خيار هو غشاء (DOW) NF270-400 / 34i للحصول على حل أمثل.

الكلمات المفتاحية: العلاج التقليدي، الترشيح الفائق، الفلترة النانوية، الانسداد.

Abstract

The Tichy-haf dam water analysis has physicochemical and bacteriological characteristics that do not fully comply with Algerian standards for water intended for human consumption. The sulphate content and the hardness register values higher than the permissible values. After examining the analysis results AMENHYD undertakes to present the technical solution allowing the water treatment station of the proposed dam to produce water that meets Algerian standards. This involves maintaining the contractual solution followed by a nanofiltration step (aeration - coagulation - flocculation - settling - Ultrafiltration - Nano filtration) with all the improvements deemed necessary at the level of the old station.

The primary objective of this study is to implement a nanofiltration membrane system that meets contractual requirements. The choice of a nanofiltration membrane allowing a lowering of the sulphate concentration and of the total hardness by choosing the most appropriate system configuration from the point of view of the efficiency of the selectivity, the necessary permeation flows, of the recycling of the concentrate and the lowest specific energy.

The simulation performed by two tools made available to us by the two world leaders in the membrane market, namely; HYDRANAUTIC and DOW. The results of the simulation showed that for a configuration without recycling of the concentrate, the number of 10 trains, each composed of 3 stages of 70 pressure tubes, each of these pressure tubes supports 6 membrane modules which are necessary to meet the terms of the contract in terms of both quantity and quality. In contrast, the simulation reports show better performance of the NF270-400 / 34i (DOW) membrane compared to the HYDRANAUTIC ESNA1-LF2-LD nanofiltration membrane, although it fully meets the customer's requirements.

Furthermore, the results obtained for a two-stage configuration with a flow rate of recirculating concentrate of about 20%, give results relatively comparable to the 3-stage variant without recirculation from the point of view of selectivity, with a more specific energy. high. At this stage, the comparison of the results of the simulations carried out reveals that the best choice is that of the NF270-400 / 34i (DOW) membrane for an optimal solution.

Keywords: Conventional treatment, Ultrafiltration, Nanofiltartion, clogging.

TABLE DES MATIERES

Table des matières.	
Liste des Figures.	
Liste des Tableaux.	
Liste des abréviations.	
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Généralités sur l'eau	3
I.2. Disponibilité de l'eau	3
I.3. Qualité et propriété de l'eau	5
I.3.1. Caractères organoleptiques.....	6
I.3.1.1. Couleur	6
I.3.1.2. Odeur et saveur	6
I.3.2. Qualité physico-chimique.....	7
I.3.3. Qualité bactériologique	7
I.4. L'objectif du traitement des eaux	8
I.5. Des traitements adaptés à la qualité de l'eau brute.....	8
I.5.1. Aération sur cascade.....	8
I.5.2. Pré-oxydation à l'hypochlorite de sodium	9
I.5.3. Coagulation.....	10
I.5.3.1. Les particules en suspension	10
I.5.3.2. Les particules mise en jeu : colloïdes	11
I.5.3.3. Le principe de phénomènes	11
I.5.3.4. Les coagulants utilisés	11
I.5.3.5. Les facteurs influençant la coagulation	12
I.5.3.6. Les avantages et les inconvénients de la coagulation- floculation	15
I.5.4. Injection de charbon actif en poudre en cas de nécessité	16
I.5.5. Décantation.....	16
I.5.6. La désinfection	17
I.6. Traitement par la technologie des membranes	18
I.6.1. Procédé membranaire à gradient de pression	19
I.6.1.1. Microfiltration (MF)	20

TABLE DES MATIERES

I.6.1.2. Ultrafiltration (UF)	21
I.6.1.3. Nanofiltration (NF)	21
I.6.1.4. Osmose inverse (OI)	21
I.6.2. Modes de filtration	22
I.6.3. Géométrie des membranes	22
I.6.3.1. Modules membranaires	23
I.6.4. Avantages et limites de la micro-ultrafiltration pour la potabilisation des eaux	24
I.6.5. Mécanisme de transfert de matière en nanofiltration	25
I.6.6. Le colmatage	27
I.6.6.1. Différents type de colmatage Le colmatage se classe en deux catégories	27
I.6.6.2. Origines et mécanismes de colmatage Il existe quatre catégories de colmatage	28
I.6.6.3. Polarisation de concentration	30
I.6.6.4. Indices et modèles de prédiction du colmatage	31
I.6.6.5. Lutte contre le colmatage	32

Chapitre II

METHODES ET TECHNIQUE EXPERIMENTALE

II.1. Description de la zone d'étude	33
II.1.1. Présentation du barrage de TICHY-HAF	33
II.2. Qualité de l'eau brute à traiter (retenue de TICHY-HAF)	34
II.3. Description de la nouvelle station de traitement du barrage TICHY-HAF	37
II.4. Description de la station de nano-filtration	38
II.5. Le Choix des membranes pour la simulation	38
II.5.1. Caractéristiques des membranes de nanofiltration selon les fournisseurs.....	39
II.5.2. Logiciels IMSDesign.....	39
II.5.3. Logiciels WAVE	40
II.5.4. La Variation de taux de conversion	40
II.5.4.1. Le Langage Python	40
II.5.4.2. Le module matplotlib	41
II.6. Conclusion.....	41

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Résultats de simulation	42
III.2. Expertise et optimisation de la configuration retenue	44
III.2.1. La simulation par logiciel WAVE.....	45
III.2.2. Performance de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes de pression sans recyclage	47
III.2.2.1.Réduction de la concentration des sulfates	47
III.2.2.2.Réduction de la dureté totale	48
III.2.2.3.Réduction du TDS	49
III.2.2.4.L'énergie spécifique	50
III.2.3. Performance de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec deux étages et 70 tubes de pression avec recyclage	51
III.2.3.1.La simulation par IMSDesign	53
III.2.3.2.La simulation par WAVE.....	52
III.2.3.3.Réduction de la concentration des sulfates	55
III.2.3.4.Réductions de la dureté totale	56
III.2.3.5.Réduction la concentration de TDS	57
III.2.3.6.Energie spécifique	58
III.2.4. comparaison des résultats	59
CONCLUSION GENERALE	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Estimation de la disponibilité de l'eau dans le monde.....	5
Figure I.2 : Pénurie d'eau dans le monde projetée jusqu'en 2025	5
Figure I.3 : Principe de filtration membranaire (en mode tangentiel)	19
Figure I.4 : Filtration en mode frontal et tangentiel	22
Figure I.5 : Représentation des différents types de colmatage.....	28
Figure I.6 : Représentation schématique des différents mécanismes de colmatage.....	28
Figure I.7 : Principe du phénomène de polarisation de concentration en absence ou en présence de gel	30
Figure I.8 : Représentation du rapport temps de filtration/volume filtré (t/V) en fonction du volume filtré V pour la détermination du MFI.....	32

CHAPITRE II METHODE ET TECHNIQUE EXPERIMENTAL

Figure II.1: Situation géographique du barrage	34
Figure II.2 : Processus de la station de traitement de TICHY-HAF 2	37

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure III.1: design de nanofiltration par IMSDesign avec 3étages et 70tubes de pression sans recyclage	43
Figure III.2 : design de nanofiltration par WAVE avec Trois étages et 70 tubes sans recyclage.....	46
La figure III.3 : l'évolution de la concentration des sulfates sous différents taux de conversion de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes	47
La figure III.4 : l'évolution de la dureté totale sous différents taux de conversion de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes. .	48
La figure III.5 : l'évolution du TDS en fonction des différents taux de conversion de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes. .	49
La figure III.6 : la variation de l'énergie spécifique en fonction des taux de conversion de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes. .	50
Figure III.7 : design de nanofiltration par IMSDesign avec 2 étages et 70 tubes avec recyclage.....	52
Figure III.8 : design de nanofiltrationavec 2étages et 70tubes avec recyclage par WAVE.....	54

LISTE DES FIGURES

Figure III.9 : l'évolution de la concentration des sulfates sous différents taux de conversion, de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec Deux étages et 70 tubes avec recyclage.....	55
Figure III.10 : l'évolution de la concentration en dureté total sous différents taux de conversion, par des deux membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400/34i avec 2 étages et 70 tubes avec recyclage.....	56
Figure III.11 : l'évolution de la concentration TDS avec différents taux de conversion par des deux membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400/34i avec 2 étages et 70 tubes avec recyclage.....	57
Figure III.12 : la variation d'énergie spécifique avec différent taux de conversion par des deux membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400/34i avec 2 étages et 70 tubes avec recyclage.....	58

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1: Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium.....	13
Tableau I.2 : Procédés membranaires classés selon la taille des pores.	19
Tableau I.3 : Classification des procédés membranaires en fonction des contaminants.....	20
Tableau I.4 : Les différentes lois pour caractériser les différentes étapes allant du blocage de pores à la formation d'un dépôt.....	29

CHAPITRE II METHODE ET TECHNIQUE EXPERIMENTAL

Tableau II.1 : différents niveaux de prise d'échantillon d'eau brute	34
Tableau II.2: résultats des analyses physico-chimiques de l'eau brute de barrage de TICHY-HAF.....	35
Tableau II.3 : résultats des analyses bactériologiques de l'eau brute de barrage de TICHY-HAF.....	36
Tableau II.4: caractéristiques des membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400.	39

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau III.1 : résultat de simulation proposée par AMENHYDE.	42
Tableau III.2 : résultat de simulation Trois étages avec 70 tubes de pression sans recyclage. 43	
Tableau III.3: résultat de simulation par IMSDesignavec deux étages et 70 tubes de pression avec recyclage	51
Tableau III.4 : résultat de simulation par WAVE avec deux étages et 70 tubes de pression avec recyclage	53
Tableau III.5 : les caractéristiques de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes de pression sans recyclage et TR=0.85.....	59
Tableau III.6 : les caractéristiques de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec deux étages et 70 tubes de pression avec recyclage et TR=0.85	59

LISTE DES ABREVIATIONS

°C : Degré Celsius.

°f : Degré Français

m : mètre

s : seconde

Da : Unité Dalton

MF : Microfiltration.

UF : Ultrafiltration.

NF : Nanofiltration.

OI : osmose inverse

MES : matières en suspension.

NET : Noir Erriochrome

O.M.S : Organisation Mondiale de la Santé.

pH : potentiel d'hydrogène.

ppm: Partie par million

T.D.S : Solides Totaux Dissous

TA : Titre alcalimétrique.

TAC : Titre alcalimétrique complet.

TH : Titre hydrométrique (dureté).

THCa : Titre hydrométrique calcique.

THMg : Titre hydrométrique magnésien.

UTN : Unité Nephelométrique de Turbidité.

J_0 : Flux initial à travers le média propre en ($m.s^{-1}$).

J : Flux du perméat ($L.h^{-1}.m^{-1}$).

t : Temps de filtration en (s).

V : Volume de perméat en (m^3).

ΔP : Pression transmembranaire (Pa).

μ : Viscosité dynamique (Pa.s)

R_m : Résistance de la membrane (m^{-1}).

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est omniprésente sur la terre, elle est la source principale et originelle de toute vie. Elle est nécessaire à la vie des végétaux, des animaux et aux activités humaines. L'eau destinée à la consommation humaine doit suivre des normes de potabilité. L'OMS définit l'eau potable comme étant celle dont la consommation est sans danger pour la santé publique. Cependant, les ressources en eau sont inégalement réparties dans le monde. L'eau recouvre 71% de la surface de la terre, seulement 1% de ce volume est donc véritablement disponible pour les êtres vivants [38]. C'est pour cela que l'eau est classée comme un patrimoine universel et qui devrait être protégée, traitée et économisée.

Le principal problème de l'eau au début du XXI^e siècle sera celui d'un approvisionnement insuffisant et incertain. Des quantités limitées d'approvisionnements en eau développés existent, et la demande croissante a dépassé l'offre dans de nombreuses régions du monde. Certains pays souffrant actuellement de stress hydrique sont principalement situés au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (c'est-à-dire que leurs ressources en eau douce par habitant sont inférieures à 1 000 m³/hab/an).

La dureté de l'eau pose beaucoup de problème lors de l'utilisation de l'eau, tels que une désactivation des lessives, formation de tartre de carbonate et d'hydroxyde de magnésium dans les tuyaux du réseau d'eau chaude, et dans les chaudières. Par ailleurs, l'eau hyper sulfate présente un goût inacceptable et la consommation de cette eau provoque la diarrhée chez les consommateurs. On trouve l'eau de surface hyposulfate dans plusieurs endroits en Algérie comme l'eau de barrage TCHY-HAF à BEJAIA. La présence d'une forte concentration en sulfate dans l'eau rend cette eau inacceptable à la consommation humaine [32].

L'eau, au cours de son parcours dans le sol ou dans les rivières, se renferme de différents polluants d'origine naturelle (Matières dissoute, particules minérales en suspension, matières organiques) et/ou d'origine humaine (Rejets industriels, agriculture, rejets domestique, accidentelle), en plus de la Pollutions microbiologiques (Virus, bactéries...), qui doivent être traités ou éliminés avant qu'elle ne soit distribuée à la population.

Les procédés membranaires sont des technologies de séparation de plus en plus utilisées dans le traitement des eaux destinées à la consommation humaine, depuis les années 70, grâce au développement des matériaux et des techniques de mise en œuvre des membranes. On les retrouve notamment dans différents secteurs industriels : industries chimiques, pharmaceutique, agroalimentaire, textile, production d'eau potable, traitement des eaux usées, etc. Plusieurs raisons permettent de justifier l'essor des techniques membranaires : la sévérité croissante de la

INTRODUCTION GENERALE

réglementation sur la protection environnementale et la santé publique.

Les procédés membranaires sont intéressants car ils présentent un triple avantage vis-à-vis des technologies conventionnelles concurrentes (distillation, séparation, extraction...).

En effet, Ils ne nécessitent aucun ajout de composé chimique, plus efficace et facilement adaptable [30].

Les objectifs du présent travail est de déterminer les limites techniques et énergétiques dans lesquelles l'opération de nanofiltration (NF) pourrait être envisagée. Une étude de cas menée depuis des expériences de simulation à l'échelle industrielle dans la station de traitement des eaux brute de barrage TCHY-HAF est effectuée.

Le corps de ce mémoire se compose de trois chapitres :

- Le premier chapitre propose une revue de la littérature sur le traitement des eaux de barrage. Des descriptions détaillées des procédés membranaires sont également présentées dans ce chapitre. Ceci est suivi d'un examen complet de la technique de la nanofiltration.

- Le deuxième chapitre est consacré à la description de la station de traitement, les matériels et méthodes, le protocole expérimental, les techniques de traitement et d'analyse physico-chimique et bactériologie.

- Le troisième chapitre est lié aux résultats et discussion de la simulation de la nanofiltration. Les résultats de ce travail sont présentés dans une étude de base qui pointe vers une approche méthodologique nouvelle et originale de membrane de nanofiltration (NF). Cette simulation est développée autour de deux types de membranes en termes de perméabilité à l'eau brute, la faisabilité technique et économique du procédé NF du type HYDRANTICS contre DOW pour produire de l'eau potable à partir de l'eau du barrage TCHY-HAF et l'accès à une eau de très bonne qualité et conforme aux normes Algériennes.

CHAPITRE I

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Généralités sur l'eau

L'eau est un élément essentiel à la vie, nécessaire à l'homme d'abord pour ses besoins alimentaires, ensuite pour ses activités agricoles et industrielles. Il en résulte que de tout temps, l'installation des populations humaines sur la terre s'est faite en fonction des ressources en eau douces.

Les ressources en eau se raréfient et leurs traitements deviennent de plus en plus difficiles et coûteux. Les maladies, l'insalubrité et bien d'autres maux freinent la marche rigoureuse vers le développement [1].

L'eau qui coule à nos robinets est un produit élaboré, qui a fait l'objet de nombreux traitements et contrôles. Il n'existe pratiquement plus à l'état naturel, d'eaux propres aux usages alimentaires et à l'hygiène corporelle [2].

I.2. Disponibilité de l'eau

L'hydrosphère terrestre représente 1,38 milliard de km³ d'eau. 97,5% de celui-ci est de l'eau de mer avec des océans couvrant environ 71% de la surface de la Terre. Parmi les 2,5 % d'eau douce de l'hydrosphère, 69,5 % se présentent sous forme de glace ou de couverture neigeuse permanente dans les régions arctiques, antarctiques et montagneuses. Les 30,1 % restants sont des eaux souterraines estimées à 10 millions de km³ [3]. Enfin, les lacs et les rivières représentent 0,4 % des ressources en eau douce, c'est-à-dire environ un 1/150000ème d'eau sur Terre.

Le principal problème de l'eau au début du XXI^e siècle sera celui d'un approvisionnement insuffisant et incertain. Des quantités limitées d'approvisionnements en eau existants développés ont dépassé la demande croissante dans de nombreuses régions du monde.

Afin d'évaluer les besoins humains locaux par rapport à la disponibilité en eau, les ressources en eau renouvelables annuelles doivent être comparées aux prélèvements humains actuels et futurs estimés à l'échelle locale. L'indicateur de stress hydrique est défini comme le rapport entre les prélèvements d'eau annuels divisés par les ressources en eau renouvelables annuelles. En 1995, l'UNESCO estimait que 1,7 milliard de personnes étaient en situation de stress hydrique. Comme le montre la figure 2, les pays qui souffrent actuellement du stress hydrique sont principalement situés au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (c'est-à-dire que leurs ressources en eau douce par habitant sont inférieures à 1 000

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

m³/hab/an). Cependant, quelques pays se trouvent également en Europe, en Asie et dans les Caraïbes. Considérant une croissance démographique moyenne (9,3 milliards de personnes en 2025) (UNESCO, 2003), il est possible de prévoir l'évolution de la consommation d'eau et d'identifier les futures situations de stress hydrique. D'ici 2025, environ 29 pays dans le monde devraient connaître une pénurie d'eau (Figure 3), notamment en raison de l'augmentation attendue de la population, qui doublera à peu près dans les régions où existent déjà de graves pénuries d'eau [3].

Les solutions traditionnelles à la pénurie d'eau se sont concentrées sur le développement de nouveaux approvisionnements (p. ex. forage de puits, construction de barrages pour stocker l'eau qui deviendrait autrement irrécupérable). Cependant, même lorsque des options sont disponibles pour développer de nouveaux approvisionnements ou transférer l'eau d'autres zones où les approvisionnements sont plus abondants, le développement de l'eau peut être extrêmement coûteux. La disponibilité de l'eau comprend des problèmes de quantité et de qualité de l'eau. Après tout, tout comme les conditions de sécheresse peuvent réduire la quantité d'eau disponible, les réductions de la qualité de l'eau peuvent diminuer l'approvisionnement en eau disponible pour son utilisation prévue. Un traitement de l'eau correctement conçu peut transformer de l'eau autrement non utilisable en eau utilisable, augmentant ainsi la quantité d'eau disponible. Les technologies de dessalement offrent le potentiel d'augmenter considérablement les approvisionnements en eau douce dans la région du monde où l'eau est rare bien que ces approvisionnements soient actuellement associés à des coûts énergétiques et financiers substantiels. Autrefois considérée comme une solution coûteuse de dernier recours pour l'approvisionnement en eau domestique et industrielle municipale marginale, la technologie de dessalement devient de plus en plus abordable. Elle trouve de nouveaux débouchés dans des régions pauvres en eau où elle n'était jusque-là jamais considérée comme un ressource viable à long terme [3].

La différence entre le coût de l'eau dessalée et celui des approvisionnements conventionnels s'est considérablement réduite au cours des 15 dernières années. La croissance du dessalement est due à l'augmentation du coût de développement de l'eau conventionnelle en raison de la pénurie d'eau, des sites de barrages moins nombreux et inappropriés avec des coûts de développement plus élevés, des aquifères plus profonds et une détérioration de la qualité de l'eau [3].

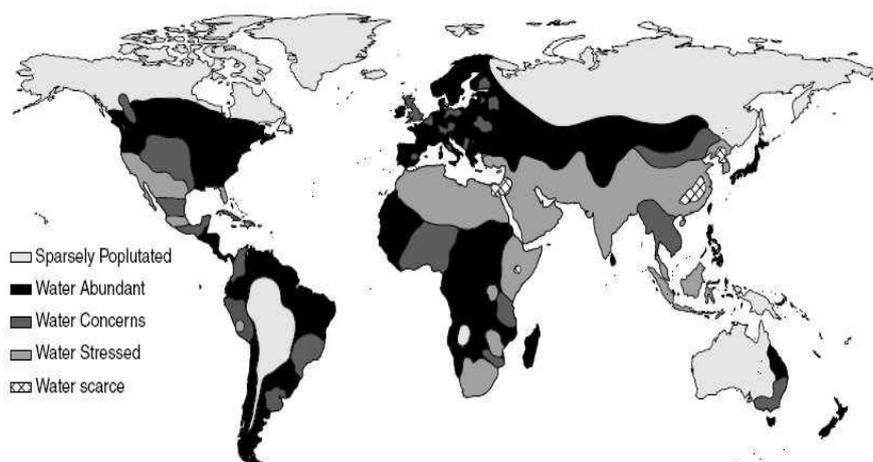


Figure I.1 : Estimation de la disponibilité de l'eau dans le monde

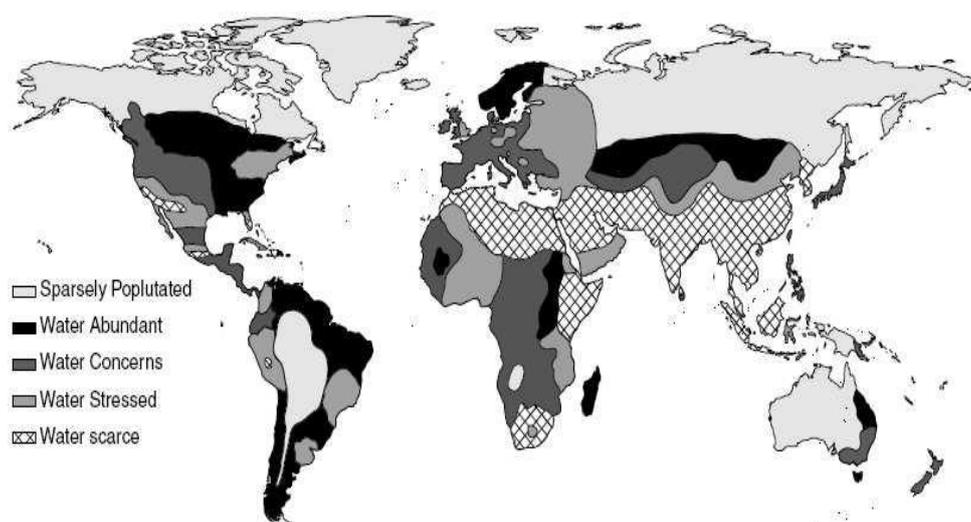


Figure I.2 : Pénurie d'eau dans le monde projetée jusqu'en 2025.

(Source : Comité d'examen de la feuille de route technologique de dessalement et de purification de l'eau, Conseil national de recherches, 2004)

I.3. Qualité et propriété de l'eau

Bien que l'eau soit un liquide inodore, incolore et insipide, d'autres propriétés physiques ou chimiques lui confèrent certaines propriétés qu'il faut comprendre afin de mieux comprendre le rôle fondamental de cette molécule sur notre planète et en tant que facteur important dans l'écosystème Organismes élémentaires importants [4].

I.3.1. Caractères organoleptiques

Les propriétés organoleptiques n'ont aucune influence directe sur la "sécurité" ou la salubrité de l'eau. Cependant, de mauvaises qualités sensorielles peuvent rendre l'eau inconfortable à boire ou non adaptée à un usage domestique. Lors de la fixation d'objectifs basés sur des considérations sensorielles, l'objectif principal est de promouvoir la production d'une eau potable agréable. Il convient également de noter que certains avantages pour la santé peuvent être liés à une eau qui répond à ces objectifs.

De plus, les qualités esthétiques et sensorielles donnent confiance aux gens dans les systèmes de distribution d'eau potable et empêchent les gens d'utiliser des sources d'eau non réglementées [5].

Ces différentes caractéristiques doivent être comprises lors du prélèvement : par exemple, certaines odeurs peuvent disparaître lors du transport, ou l'aspect de l'échantillon peut changer lors du stockage (couleur, aspect de précipitation, etc.) [6].

I.3.1.1. Couleur

Reflet des paramètres d'interférence esthétique, la couleur de l'eau peut : Avoir une origine naturelle (fer et manganèse en eau profonde, humus en eau de surface). C'est une des conséquences des lacs, étangs, barrages et autres phénomènes d'eutrophisation (surdéveloppement d'algues et de plancton). Avoir une source de l'industrie chimique (teinture et colorant de tannerie et de l'industrie de l'impression textile) [7].

I.3.1.2. Odeur et saveur

L'eau destinée à l'alimentation doit être inodore. En effet, toute odeur est signe de pollution due à la présence de matière organique en décomposition. Ces substances sont généralement en si petites quantités qu'elles ne peuvent pas être détectées par des méthodes analytiques ordinaires. Le sens olfactif seul peut parfois les détecter.

Les échantillons doivent être prélevés dans des récipients en verre hermétiques. Les contenants en plastique devraient être interdits. L'examen doit être effectué dès que possible après le prélèvement de l'échantillon. L'échantillon peut éventuellement être conservé à 4°C (+/- 2°C) en évitant le contact avec les odeurs étrangères. Le temps de stockage ne doit pas dépasser 72 heures.

➤ *L'odeur peut être définie comme :*

a) toutes les sensations perçues par l'organe olfactif en reniflant certaines substances volatiles .

b) la qualité de cette sensation particulière provoquée par chacune de ces substances [6].

I.3.2. Qualité physico-chimique

La qualité physico-chimique de l'eau renseigne sur la localisation et l'évaluation d'un niveau de pollution, à partir d'un ensemble de paramètres. Basée sur des valeurs de référence, elle est appréciée selon plusieurs paramètres :

➤ Qualité physique

Matières en suspension, turbidité, transparence, température, conductivité et salinité.

➤ Qualité chimique

Le pH, les sels minéraux, la matière organique (Demande Biologique en Oxygène en 5 jours, Carbone Organique Dissous), l'oxygène dissous, nitrites, nitrates, ammonium, phosphate, silice, les pesticides, etc. Ces paramètres permettent d'acquérir des connaissances de base, de développer une surveillance pour détecter les perturbations et de mettre en place une surveillance pour fournir un retour d'expérience sur la gestion [8].

I.3.3. Qualité bactériologique

L'analyse bactériologique a pour but de mettre en évidence la présence de germes, à partir de la recherche et du dénombrement de ceux-ci dans les échantillons à analyser. L'analyse n'est pas seulement qualitative mais aussi quantitative.

Il est à noter qu'un examen bactériologique ne peut être interprété que s'il est effectué sur un échantillon correctement prélevé dans un récipient stérile, selon une procédure précise évitant toute contamination accidentelle, correctement transporté au laboratoire et analysé sans délai ou après une courte durée de conservation dans des conditions satisfaisantes.

L'eau doit également être potable d'un point de vue bactériologique, puisqu'elle est destinée à la consommation humaine, l'eau potable doit répondre aux conditions bactériologiques suivantes :

Dans le cas des eaux traitées, ne pas contenir de coliformes totaux et fécaux ou de

clostridium sulfite-réducteurs, indicateurs de pollution par les matières fécales [9].

I.4. L'objectif du traitement des eaux

- La santé publique, qui implique que l'eau distribuée ne doit apporter aux consommateurs ni substances toxiques (organiques ou minérales), ni organismes pathogènes. Elle doit donc répondre aux normes physico-chimiques et bactériologiques ;
- L'agrément du consommateur, qui est différent du premier point car une eau peut être agréable à boire toute en étant dangereuse (source polluée...) il s'agit des qualités organoleptiques, c'est-à-dire ce qui est perçu par les sens olfactifs de l'homme à savoir la couleur, l'odeur et le goût ;
- La protection du réseau de distribution, et aussi des installations des usages (robinetterie, chauffe-eau) contre l'entartrage (et/ ou) la corrosion [10].

I.5. Des traitements adaptés à la qualité de l'eau brute

Il existe de nombreux procédés de base pour le traitement de l'eau brute. L'ordre des différentes étapes de traitement dépendra de la qualité des ressources. Chaque procédé peut changer de rôle en fonction de la place qu'il occupe dans la filière du traitement [2].

Le procédé de traitement des eaux destinées à la consommation humaine doit privilégier une bonne désinfection. Selon la qualité de l'eau, jusqu'à trois étapes de traitement (prétraitement physique et chimique, clarification et traitement d'épuration) peuvent être réalisées [11].

I.5.1. Aération sur cascade

L'aération permet de mélanger l'air à l'eau pour favoriser les réactions d'oxydation, enlever les gaz dissous et par conséquent éliminer les mauvais goûts et les odeurs. L'aération suit les lois de l'échange gaz-liquide, c'est-à-dire les lois de Henry, de Dalton et des gaz parfaits ainsi que les théories de Witman et Lewis pour le transfert des solutés à travers une interface air-liquide.

Une fois insérée à la tête de la chaîne de traitement, l'aération peut être utilisée comme étape de pré-oxydation de l'eau brute.

Cette aération est nécessaire lorsque l'eau présente une carence en oxygène et permet alors, soit :

- D'oxyder des éléments réduits, tels les ions ferreux, manganèses,....
- D'augmenter la teneur en oxygène dans l'eau (améliorer le goût, éviter la corrosion des conduites métalliques en formant une couche protectrice).
- D'éliminer des gaz indésirables (H_2S , CO_2 libre, sursaturation en oxygène, composés organiques volatils, etc.) [12].

I.5.2. Pré-oxydation à l'hypochlorite de sodium

L'oxydation peut avoir différents objectifs :

- Éliminer le goût, les odeurs et la couleur ;
- Éliminer l'ammoniaque ;
- Éliminer le fer et le manganèse : l'oxydation les transforme en hydroxydes insolubles facilement séparables du liquide par décantation et filtration ;
- Améliorer la clarification (meilleure cohésion des boues dans le décanteur qui permet d'augmenter la vitesse de l'eau) ;
- Oxyder les matières organiques dissoutes, qui se transforment en composés plus facilement biodégradables.

Les composés les plus souvent utilisés sont des agents chlorés, le chlore gazeux (Cl_2), l'hypochlorite de sodium ou « eau de javel » (NaOCl), le dioxyde de chlore (ClO_2), l'ozone (O_3) et le permanganate de potassium (KMnO_4).

Le choix de l'oxydant dépend de la qualité des eaux brutes utilisées et des objectifs que l'on veut atteindre [13].

I.5.3. Coagulation

Dans le cas d'eaux de surface, il s'agit généralement d'une clarification complète avec coagulation, floculation, décantation (ou flottation) et filtration. Pour les eaux très turbides (MES > 5 g/L), une pré-décantation (ou débouage) doit être pratiquée avec coagulation alors que, pour les eaux peu turbides (nappe alluviale ou eau souterraine d'origine karstique), une simple (ou double) filtration avec coagulation sur filtre ou encore une filtration sur membrane d'ultrafiltration peuvent suffire [11].

La couleur et la turbidité des eaux de surface sont dues à la présence de particules de très petit diamètre : les colloïdes. Leur élimination ne peut reposer sur des solutions simples. En effet, leur vitesse de décantation est extrêmement faible. Le temps nécessaire pour se déplacer de 1 m en chute libre peut être de plusieurs années. La coagulation et la floculation sont des procédés d'élimination des colloïdes. La coagulation du sang consiste à les rendre instables. Il s'agit de neutraliser leur charge électrostatique répulsive et de les laisser se rencontrer. La floculation les amène à s'agglomérer en agrégats éliminés par sédimentation et/ou filtration [14].

I.5.3.1. Les particules en suspension

Les matières existantes dans l'eau peuvent se présenter sous les trois groupes suivants :

Les matières en suspension qui regroupe les plus grosses particules, ces matières sont d'origine minérale ou organique et possèdent un diamètre supérieur à 1 µm. leur temps requis pour décanter d'un mètre varie de quelques dixièmes de secondes à plusieurs jours selon leur diamètre et leur densité.

Les matières colloïdales sont des MES de même origine mais de diamètre inférieur à 1 micron. Leur vitesse de décantation est pratiquement nulle. Les matières colloïdales d'origine minérale ont une densité relative de l'ordre 2,65 alors que celles d'origine organique ont une densité relative beaucoup plus faible, soit de l'ordre de 1,1. Les particules colloïdales de faible densité peuvent nécessiter théoriquement jusqu'à 66600 années pour décanter de un mètre.

Les matières dissoutes, sont généralement des cations ou anions de quelques nanomètres de diamètre [15].

I.5.3.2. Les particules mise en jeu : colloïdes

Les particules colloïdales sont des matériaux inertes ou vivants (argile, hydroxyde métallique, micro-organismes, fibres, pulpe, protéines, etc.), et leur taille est très petite, comprise entre 1nm et 1µm.

Les sources de colloïdes sont très diverses. Il s'agit notamment de l'érosion des sols, de la dissolution minérale, de la décomposition de la matière organique, des eaux usées urbaines et industrielles et des rejets de déchets agricoles [14].

I.5.3.3. Phénomènes de coagulation

Le mot coagulation vient du latin coagulare, qui signifie « cohésion ». Les particules colloïdales de la solution sont naturellement chargées négativement. Par conséquent, ils ont tendance à se repousser et à rester suspendus. On dit que les particules dans la solution sont stables. La coagulation consiste à déstabiliser les particules de la suspension en neutralisant leur charge négative. Des réactifs chimiques appelés coagulants sont utilisés pour effectuer cette opération [16].

L'ajout de coagulant produit d'une part une série de réactions compliquées d'hydrolyse, d'ionisation et de polymérisation, et d'autre part, il rend le colloïde instable à travers une série de mécanismes compliqués [17].

I.5.3.4. Les coagulants utilisés

L'efficacité de la clarification dépend d'abord du coagulant utilisé. Les coagulants les plus efficaces sont des sels de métaux, à bases d'aluminium ou de fer [21].

+ Les sels d'aluminium :

- Le sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18\text{H}_2\text{O}$).
- Le chlorure d'aluminium ($\text{Al Cl}_3, 6 \text{H}_2\text{O}$).
- L'alumine de sodium seul (NaAlO_2).
- L'addition de sulfate d'aluminium et l'aluminate de sodium.
- Le polychlorure basique d'aluminium ($\text{Al}_2 (\text{OH})_5\text{Cl}$).

Les sels de fer :

- Le sulfate ferrique ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$).
- Le chlorure ferrique (FeCl_3).
- Le sulfate ferreux (FeSO_4).

I.5.3.5. Les facteurs influençant la coagulation

Afin d'optimiser la coagulation, il faut tenir compte de plusieurs variables en interrelation [20].

Ces variables sont liées à la qualité de l'eau à traiter : pH, turbidité, couleur, sels dissous et température. D'autres sont liés au traitement lui-même : la nature, la posologie et le mode d'injection du coagulant [22].

Les interrelations complexes entre ces facteurs interdisent actuellement toute approche théorique permettant de prédire quelles sont les concentrations optimales de coagulants [10].

A. L'influence du pH :

La variable la plus importante à considérer lors de la solidification est le pH. Pour chaque type d'eau, il existe une gamme de pH permettant de terminer rapidement la coagulation, qui dépend du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. Si la coagulation se produit en dehors de cette plage optimale, il est recommandé d'augmenter la quantité de coagulant ou d'utiliser une eau de moins bonne qualité pour répondre aux exigences [20].

Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium sont présentées dans le tableau suivant [22].

Tableau I.1: Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium.

Forme prédominante	pH
$\text{Al}(\text{OH})_3$	5,8 à 7,2
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	5,5 à 8,3

B. L'influence de la minéralisation :

Les sels contenus dans une eau exercent les influences suivantes sur la coagulation et la floculation :

- ❖ Modification de la plage de pH optimale ;
- ❖ Modification du temps requis pour la floculation ;
- ❖ Modification de la quantité de coagulant requis ;
- ❖ Modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent [20].

C. L'influence de la température de l'eau :

La température est un facteur physique important qui joue un rôle important dans le processus de solidification. En effet, les basses températures vont faire augmenter la viscosité de l'eau, ce qui crée une série de difficultés dans le processus : la coagulation et la sédimentation des floes ralentissent, et la plage de pH optimale diminue. Pour éviter ces difficultés, une solution est de changer le coagulant selon la saison [16].

D. L'influence du coagulant :

Le choix du coagulant influence les caractéristiques de la coagulation, autrement dit, les finalités de traitement, même si l'alun est le coagulant le plus utilisé. Il peut être avantageux de le remplacer par un autre coagulant ou de mettre de l'adjuvant selon les caractéristiques de l'eau à traiter.

On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale pour une eau donnée, qui après avoir effectués des essais en laboratoire la théorie qui explique les différents mécanismes de déstabilisation des particules colloïdales n'est pas suffisamment développée pour qu'on puisse résoudre un problème aussi complexe. Cette théorie est cependant très utile aux moments de la planification des essais de laboratoire et de l'interprétation des résultats obtenus.

Ainsi, même si le sulfate d'aluminium est le coagulant le plus fréquemment utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par du sulfate ferrique. Ce dernier procure en effet à plusieurs eaux une plage de pH optimal plus large que celle due à l'alumine. De plus pour un même pH élevé, le sulfate ferrique est moins soluble que l'alun [14].

E. L'influence de l'agitation :

Le processus de coagulation floculation se déroule généralement en deux étapes :

La première étape : consiste à effectuer une agitation rapide et vigoureuse dans un court laps de temps (jusqu'à 2 minutes). Son but est de favoriser la dispersion et l'homogénéisation du produit injecté dans l'eau à traiter, mais une forte agitation peut empêcher l'agrégation des particules.

La deuxième étape : Agiter lentement (30-60 minutes), dont le but est de faire entrer les particules en contact pour former des floccs de décantation [21].

F. L'influence de la turbidité :

La turbidité est un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de coagulation [16]. Elle est principalement due à la présence de particules de diamètre de 0,2 à 5 μm . Il s'agit donc là de grosses particules colloïdales qui peuvent se déposer naturellement [20].

Cependant, l'augmentation de la quantité de coagulant ne change pas linéairement avec la turbidité. Lorsque la turbidité est élevée, la quantité de coagulant nécessaire est relativement faible, car la probabilité de collisions entre particules est élevée. En revanche, lorsque la turbidité est faible, la coagulation est difficile [23].

G. L'influence de la couleur :

Des études ont montré que 90 % des particules produisant des couleurs ont un diamètre supérieur à 3,5 nanomètres ; par conséquent, ces particules sont des particules colloïdales beaucoup plus petites que les particules qui causent la turbidité.

La plupart des particules responsables de la couleur ont une charge négative à leur surface.

La quantité de coagulant nécessaire dépend de la couleur initiale ; pour la valeur de pH optimale, la couleur résiduelle diminue proportionnellement à l'augmentation de la quantité de coagulant. La plage de pH optimale pour l'élimination de la couleur se situe entre 4 et 6 [20].

I.5.3.6. Les avantages et les inconvénients de la coagulation- floculation

A. Les avantages

- L'utilisation de ce procédé chimique est très répandue, il y a donc beaucoup d'équipement déjà existant et une multitude d'agents chimiques disponibles.
- Les systèmes de coagulation-floculation chimique sont généralement automatisés et demandent donc peu de surveillance et d'entretien. Une main-d'œuvre hautement qualifiée n'est souvent pas nécessaire.
- Contrairement aux systèmes biologiques, ce système requiert moins d'espace et les coûts d'installation sont moins importants.
- Une réduction significative est obtenue en terme de micropolluants, de métaux lourds, de bactéries et de virus.
- Les systèmes chimiques de coagulation-floculation peuvent être conçus afin d'obtenir un produit à valeur ajoutée [24].

B. Les inconvénients

- Puisqu'il y a plusieurs réactions en compétition dans ce type de système chimique et plusieurs degrés d'alcalinité en plus des autres facteurs influençant le procédé, il est particulièrement difficile d'établir les bons dosages. Beaucoup d'essais à l'échelle laboratoire sont donc nécessaires pour trouver un traitement optimal. Une surdose de coagulant chimique peut diminuer l'efficacité du système.
- Les coagulants utilisés sont souvent corrosifs, des normes de sécurité doivent être respectées afin que les travailleurs manipulent ces substances avec précaution.
- La présence d'aluminium résiduel peut entraîner des problèmes importants pour la santé comme l'Alzheimer et autres pathologies de ce genre. Il est donc toxique pour les écosystèmes. Le fer aussi est toxique pour la faune. Cette toxicité génère plusieurs inquiétudes au niveau du grand public.
- En eau froide, le processus est peu efficace.
- Pour les pays en voie de développement, les coagulants chimiques peuvent être trop coûteux [24].

I.5.4. Injection de charbon actif en poudre en cas de nécessité

Les charbons actifs sont obtenus par traitement thermique, jusqu'à 1000°C de charbons naturels (anthracite, tourbe) ou de végétaux (bois, noix de coco).

Ce traitement va augmenter considérablement leur surface interne et leur porosité. Ainsi, le charbon actif sera capable de fixer les composés organiques dissous qui ont échappé à la clarification ainsi que la majeure partie des hydrocarbures, pesticides, substances pharmaceutiques, métaux lourds...

Le charbon actif en poudre est ajouté dans le décanteur après la coagulation, juste avant la floculation, alors que le charbon actif en grains est utilisé sous forme de lit filtrant lors de la filtration [12].

I.5.5. Décantation

Cette étape précède la filtration et suit la coagulation et la floculation. Une fois le floculant ou aide-coagulant injecté et mélangé à l'eau, cette dernière est dirigée vers les bassins de sédimentation appelés aussi décanteurs. Ce sont de gros bassins avec un temps de rétention assez élevé pour permettre aux flocons qui formaient la turbidité et la couleur de couler au fond du bassin et de s'accumuler pour former de la boue qui devra être régulièrement extraite afin de prévenir les accumulations. L'eau sera ensuite acheminée vers les filtres qui enlèveront les plus petites particules qui n'ont pas été sédimentées ou décantées lors de l'étape précédente.

I.5.6. La désinfection

L'objectif de cette étape est la destruction de la population microbienne contenue dans l'eau afin de protéger la santé publique [25].

Les réactifs mis en œuvre pour la désinfection des eaux alimentaires sont identiques à ceux de l'oxydation. Néanmoins, l'oxydation et la désinfection restent deux étapes bien distinctes :

- L'oxydation intervient au début de la chaîne de traitement-entre le traitement physique et la clarification- on parle généralement de « préoxydation » ;

- La désinfection intervient en toute fin de traitement-avant la mise en distribution de l'eau- on parle souvent de « post chloration ».

La désinfection au chlore ou à l'hypochlorite de sodium- est simple à mettre en œuvre (injection directe à partir d'une bouteille de chlore ou d'une pompe doseuse).

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

La désinfection au chlore a l'inconvénient de former des composés organiques chlorés tels que les trihalométhanes (THM) et de générer des mauvais goûts.

Le dioxyde de chlore (ClO₂) est également un bon désinfectant. Son pouvoir rémanent est plus important que celui du chlore. Il persiste donc plus longtemps dans les réseaux de distribution. Le pH a peu d'effet sur son efficacité et il ne forme pas de composés indésirables comme les THM. Il peut par contre former d'autres sous-produits : les chlorites et les chlorates.

L'ozone est un désinfectant puissant, capable notamment d'éliminer les virus. Il a l'inconvénient de ne pas être rémanent. Son pouvoir désinfectant important permet néanmoins de limiter la chloration de l'eau avant sa mise en distribution : ce qui a pour conséquence d'améliorer sa qualité gustative.

Le permanganate de potassium n'est généralement pas utilisé pour la désinfection des eaux, principalement en raison de sa faible vitesse de réaction vis-à-vis des bactéries.

Deux autres techniques, ne faisant pas appel à des oxydants chimiques peuvent également être en œuvre pour la désinfection des eaux alimentaires :

Les rayonnements ultra-violet : ils ont un effet bactéricide maximum à 250 nm et sont obtenus au moyen de lampes à basse pression de vapeur de mercure. Ils ne produisent pas de sous-produit indésirable, mais exigent une très bonne qualité d'eau vis-à-vis de MES et de la turbidité. Leur absence d'effet rémanent limite généralement leur utilisation aux réseaux de distribution courts. Sinon, il faut les faire suivre d'une chloration, ce qui fait perdre de son intérêt à cette technique.

Les membranes de filtration sont plus ou moins capables de retenir, en fonction de leur seuil de coupure, les microorganismes présents dans l'eau (la microfiltration retient la plupart des bactéries et protozoaires, l'ultrafiltration et la nanofiltration retiennent tout ou partie des virus). Actuellement, leur mise en place pour la seule désinfection est peu réaliste sur le plan économique, car ce type d'équipement entraîne sur une filière complète de traitement un surcoût important (de l'ordre de 30 %). On peut néanmoins bénéficier de cette technologie récente lorsque plusieurs paramètres sont à éliminer (turbidité, matières organiques, pesticides) et sur des sites de production importants.

Enfin, quel que soit le mode de désinfection, il est conseillé de laisser un résiduel de chlore, de l'ordre de 0,1 à 0,2 mg/l ; pour protéger le réseau de distribution contre les reviviscences bactériennes [26].

I.6. Traitement par la technologie des membranes

La filtration membranaire est un procédé de séparation physique en phase liquide. Elle repose sur le principe de perméation à travers une membrane perméselective. Cette membrane perméselective, selon ses caractéristiques intrinsèques et son mode d'utilisation, constitue une barrière permettant (ou favorisant) certains transferts de matière et en limitant d'autres (figure 3).

Les forces motrices permettant la perméation à travers la membrane peuvent être la diffusion d'une des deux phases (transport actif) mais également des différentiels de pressions, de concentrations, ou de potentiels électriques (transport passif). En fonction de la taille de ses pores, la membrane de filtration constitue une barrière physique absolue pour des molécules ou particules de taille supérieure à un certain seuil. C'est l'avantage principal que présente la filtration membranaire en comparaison aux traitements conventionnels.

En effet, ceux-ci consistent en une filtration sur média granulaire (sable et/ou charbon actif), qui ne constitue pas un filtre absolu. Contrairement à la filtration membranaire, la qualité de l'eau filtrée par procédé traditionnel dépend grandement de l'eau brute traitée.

À l'issue d'une opération de filtration membranaire, deux phases sont obtenues :

- le rétentat (ou concentrât) dans lequel se concentrent les molécules et/ou particules retenues par la membrane ;
- le perméat, exempt des molécules et/ou particules retenues.

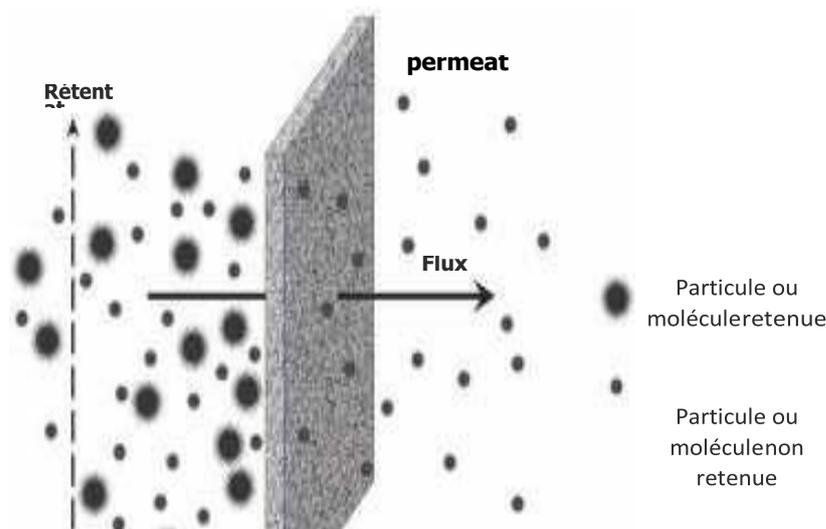


Figure I.3 : Principe de filtration membranaire (en mode tangentiel). [27]

I.6.1. Procédé membranaire à gradient de pression

Les procédés baromembranaires sont des procédés de filtration membranaire qui utilisent un gradient de pression comme force motrice. Actuellement, il y a quatre principaux procédés qui sont utilisés pour produire de l'eau potable : Microfiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) et Osmose Inverse (OI). Les filtrations membranaires peuvent être distinguées selon la taille moyenne des pores de membranes mises en œuvre mais aussi par les gammes de pression transmembranaire utilisées pour réaliser la séparation.

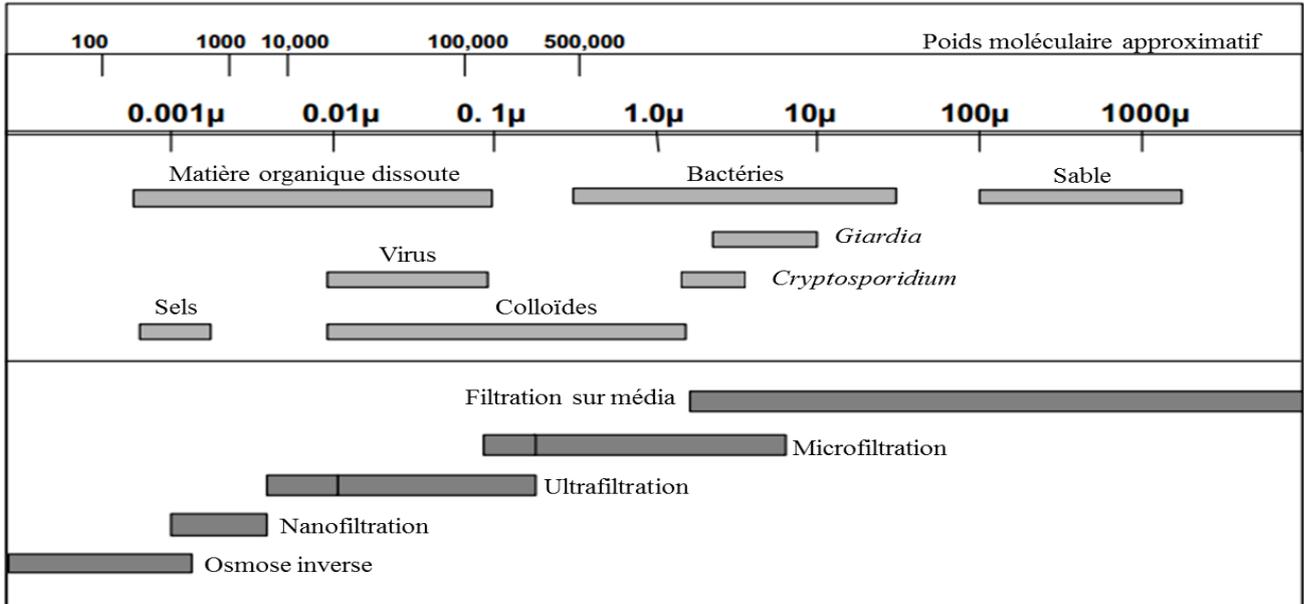
Tableau I.2 : Procédés membranaires classés selon la taille des pores [39].

Procédé de séparation	Osmose inverse (OI)	Nanofiltration (NF)	Ultrafiltration (UF)	Microfiltration (MF)
Taille des pores	Membrane dense	0,1 – 1 nm	1 – 100 nm	0,1 – 10 µm
Nature des plus petites espèces retenues	Ions monovalents	Ions et petites Molécules	Macromolécules	Microorganismes, colloïdes, particules solides
Pression de service (bar)	30 – 100	5 – 30	1 – 5	0,5 – 2

On peut également présenter dans le tableau ci-dessous la classification des procédés membranaires en fonction des contaminants.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau N I.3 : Classification des procédés membranaires en fonction des contaminants.



Cette représentation résume un ensemble de technologies de filtration, qui vont de l'osmose inverse, qui laisse passer le solvant (eau) et empêche tous les sels de passer, à la filtration classique, qui permet de filtrer des objets de la taille d'un cheveu [40].

I.6.1.1. Microfiltration (MF)

Il s'agit d'un procédé de séparation pneumatique solide-liquide par membrane, qui utilise des membranes macroporeuses avec des diamètres de pores de 0,1 et 10 µm, qui sont plus petites que les bactéries. Les espèces retenues par la membrane sont des particules en suspension, des bactéries et des colloïdes. La pression de fonctionnement est relativement faible (<350 kPa) et le flux de perméation est élevé (10^{-2} à 10^{-4} m/s). Ce procédé de séparation est l'un des procédés les plus utilisés dans l'industrie, notamment dans divers domaines, tels que :

- Clarification de l'eau,
- Stérilisation de la solution,
- Séparation des émulsions eau/huile [33].

I.6.1.2. Ultrafiltration (UF)

Il s'agit d'un procédé de séparation pneumatique par membrane. Cette technique utilise

une membrane microporeuse avec une taille de pores comprise entre 1 et 100 nm. Cette membrane laisse passer les petites molécules et bloque les molécules de masse molaire élevée. Les membranes d'ultrafiltration se caractérisent par leur valeur seuil (SC). La valeur de coupure de ces membranes est comprise entre 1000 et 100000 Da. La pression de fonctionnement en ultrafiltration est encore très faible (50-500kPa). Il existe de nombreuses applications :

- La concentration de solutions de macromolécules (protéines, polysaccharides, polymères divers).

- Éliminer les gros solutés dans les eaux usées ou l'eau à des fins domestiques, industrielles (électroniques) ou médicales [33].

I.6.1.3. Nanofiltration (NF)

La Nanofiltration (NF) désigne la technique de séparation baromembranaire permettant la rétention de composés ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre. Les solutés retenus sont des sels ionisés multivalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} ,...), des composés organiques de masse molaire faible ainsi que, partiellement, des sels monovalents. Ces membranes ont des seuils de coupure entre 300 et 1000 Da. La pression d'opération en NF varie de 500 à 1500 kPa [43].

I.6.1.4. Osmose inverse (OI)

Parmi toutes les membranes actuellement utilisées dans l'eau potable, c'est le seul procédé membranaire pneumatique à la structure la plus dense. Le principe est de faire passer le solvant à travers la membrane sous très haute pression, et le seuil de coupure est inférieur à 300 Da. Ces membranes peuvent retenir des ions monovalents de très faible masse molaire (Na^+ , Cl^-). Cette technique est utilisée pour :

- Dessalement de l'eau de mer.

- Dessalement des eaux saumâtres.

- Production d'eau ultrapure [33].

I.6.2. Modes de filtration

Une opération de filtration membranaire peut être mise en œuvre selon deux configurations différentes : en **mode frontal** (*dead-end filtration*) ou **tangentiel** (*cross-flow filtration*).

Dans le cas d'une filtration en mode frontal, le fluide à filtrer circule perpendiculairement à la membrane. Il en découle un débit de concentrât Q_R nul (figure I.4.a).

Ce mode de fonctionnement induit une accumulation importante de matière à la surface de la membrane au cours de son utilisation, ce qui en réduit progressivement la perméabilité.

Afin de limiter ce phénomène, la filtration en mode tangentiel consiste à imposer au fluide à filtrer une circulation parallèle à la surface de la membrane (figure I.4.b). Cette configuration permet d'obtenir dans une certaine gamme de débits, des contraintes de cisaillement constantes à la surface de la membrane, et donc de limiter le colmatage [27].

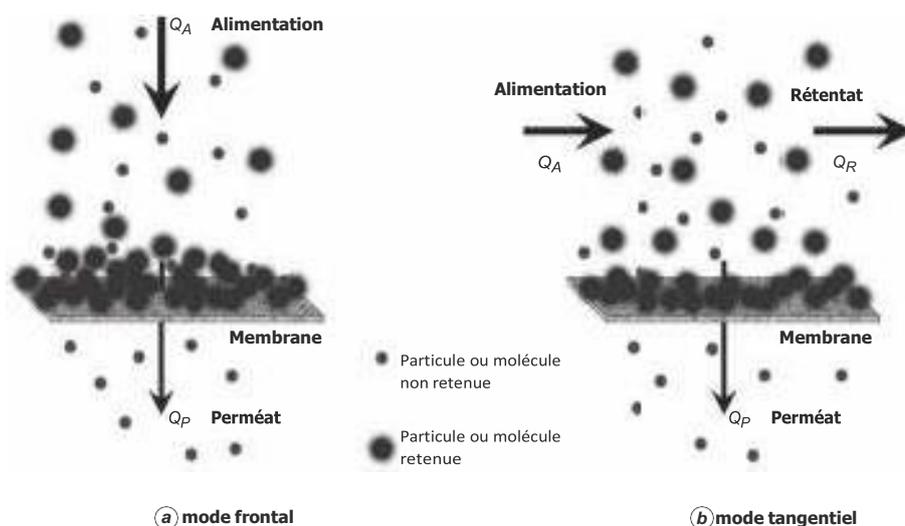


Figure I.4 : Filtration en mode frontal et tangentiel. [27]

I.6.3. Géométrie des membranes

Les membranes de filtration se présentent soit de façon simple soit assemblées en module. Les membranes simples (planes, tubulaires, fibres creuses) sont rarement rencontrées dans les installations à dimension industrielles, leur utilisation est souvent réservée pour les études de laboratoire. En général, les membranes sont assemblées en modules (plans, spiralés, fibres creuses ou tubulaires). Cette dernière configuration permet de gagner en compacité et en surface membranaire.

I.6.3.1. Modules membranaires

➤ *Les modules plans*

Les modules plans sont des assemblages de membranes planes en forme de filtre-presses, agencées en cellules. Chaque cellule du module plan membranaire est constituée d'un compartiment en amont dit *d'alimentation* dans lequel circule le retentât sous pression et d'un compartiment en aval qui recueille le perméat. La membrane est alors logée entre les deux compartiments. Ces modules sont en général de faible efficacité car ils disposent d'une surface filtrante très faible par rapport à leur volume d'encombrement [28].

➤ *Les modules spiralés*

Ces modules sont constitués de plusieurs assemblages élémentaires composés chacun d'un espaceur d'alimentation, d'une membrane et d'un espaceur de perméat. Cet empilement est enroulé autour d'un tube central perforé qui assure la collecte du perméat en provenance de tous les espaceurs. Une telle structure exige que les membranes soient souples. C'est pourquoi les modules spiralés sont constitués de membranes organiques, mais avec la particularité de travailler à des pressions transmembranaires élevées. Les modules spiralés représentent la majorité du parc mondial de membranes [28].

➤ *Les modules tubulaires*

A l'instar des échangeurs de chaleur tubulaires, les modules tubulaires sont constitués d'un faisceau de tubes disposés dans une calandre (carter), dans laquelle est collecté le perméat. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel et l'écoulement à l'intérieur de ces tubes est souvent turbulent (vitesse d'écoulement élevée) [29].

➤ *Les modules en fibres creuses*

Les fibres de ces modules sont disposées en série dans un carter tubulaire. Elles sont collées à leurs extrémités sur le carter. L'alimentation se fait à l'un des bouts et la sortie du retentât dans l'autre. Le perméat est récupéré soit à l'extérieur soit à l'intérieur des fibres [28].

Ces modules présentent deux configurations de modules selon la position de la couche active (interne ou externe) :

- la *configuration Interne-Externe*, dans laquelle la couche active est interne. La filtration s'opère comme dans le cas des modules tubulaires ; l'alimentation se fait à l'intérieur des fibres et le perméat est collecté à l'extérieur des fibres.

- la *configuration Externe-Interne* ; contrairement à la configuration précédente, la couche active est externe, la solution à traiter circule à l'extérieur des fibres et le perméat est recueilli à l'intérieur.

Les modules à fibres creuses sont très utilisés en filtration membranaire à l'échelle industrielle car ils sont généralement compacts et moins onéreux [30].

I.6.4. Avantages et limites de la micro-ultrafiltration pour la potabilisation des eaux

Les techniques membranaires sont avantageusement utilisables dans une grande variété d'opérations liées à la séparation tant liquide/solide que solide/gaz ou gaz/gaz... Pour la potabilisation des eaux, les membranes basse pression sont les plus communément utilisées, notamment les membranes d'ultrafiltration. Les avantages de l'Ultrafiltration par rapport à un procédé conventionnel de traitement reposant sur des opérations unitaires physico-chimiques sont nombreux :

- quelle que soit la qualité de l'eau brute et ses fluctuations au cours du temps, l'ultrafiltration fournit un perméat de qualité constante et parfaite en terme de MES, de bactéries et de virus.

- l'utilisation de produits chimiques (coagulant, floculant) est évitée ou limitée si la qualité de l'eau brute impose un prétraitement.

- l'étape de pré-désinfection que fournit la séparation membranaire permet de limiter l'utilisation de chlore en fin de traitement.

- grâce à l'utilisation de modules membranaires rassemblés en blocs, les installations sont compactes, faciles à remplacer et à automatiser.

Cependant, lorsque l'eau brute à traiter contient une quantité non négligeable de matière organique dissoute, le taux de rétention d'une membrane d'ultrafiltration vis-à-vis de ces composés ne permet pas d'assurer une qualité d'eau conforme à la législation [31].

Ces techniques posent par contre toujours certains problèmes quant à leurs choix, leur utilisation et leur durée de vie.

Le premier problème est lié au choix du seuil de coupure d'une membrane, car en effet, le seuil de coupure est défini comme le seuil au-delà duquel les molécules de masse molaire supérieure à ce dernier seront rejetées à plus de 95 % [31]. Pour pallier cette sélectivité imparfaite, en industrie, la séparation se fait généralement pour des molécules qui ont un rapport masse moléculaire sur seuil de coupure supérieur ou égal à 10 [32].

Le second problème est lié à leur durée de vie. De manière générale, et plus particulièrement avec les membranes organiques, la résistance mécanique diminue et se détériore avec les contraintes mécaniques dues aux mises sous pression, les traitements acido-basiques, et l'utilisation des détergents lors du nettoyage, etc.... diminuant ainsi nettement leur durée de vie.

Le dernier problème est lié à la séparation qui par définition retient une partie des espèces, ce qui entraîne l'apparition d'une accumulation de matière et d'un dépôt à la surface de la membrane, appelé colmatage. Le colmatage est un problème récurrent rencontré sur les installations de traitement des eaux et qui limite les performances des unités de filtration membranaire. Il est associé à l'accumulation de matières au voisinage de la membrane qui s'accompagne d'une diminution du volume d'eau traitée et/ou d'une augmentation des pressions à appliquer. Ainsi, le colmatage constitue la principale limitation des opérations de filtration [33].

I.6.5.Le colmatage

C'est l'ensemble des phénomènes qui entraînent une diminution du flux au cours du temps. Il s'agit de phénomènes physiques, chimiques, biologiques, se produisant à l'interface membrane -solution ou dans le volume poreux et dont la conséquence est une obstruction des pores entraînant à la fois des variations de perméabilité et de sélectivité. Il est reconnu comme étant la barrière principale au développement de la filtration membranaire dans l'industrie du traitement de l'eau [34]. Toutefois, le colmatage peut être contrôlé et limité dans des conditions expérimentales adaptées.

I.6.5.1. Différents type de colmatage Le colmatage se classe en deux catégories

- le colmatage réversible, dû à l'accumulation de matière à la surface de la membrane, qui est éliminé simplement en supprimant la pression transmembranaire ou par simple rinçage avec le solvant (lavage chimique : lavage acide, alcalin et/ou utilisation d'oxydant comme le chlore).

- le colmatage irréversible correspond à une perte irrémédiable de la perméabilité observée après un lavage chimique.

Ensuite, le colmatage est séparé en sous-catégories selon les types de lavages qui sont appliqués. La figure suivante en est une illustration graphique [37].

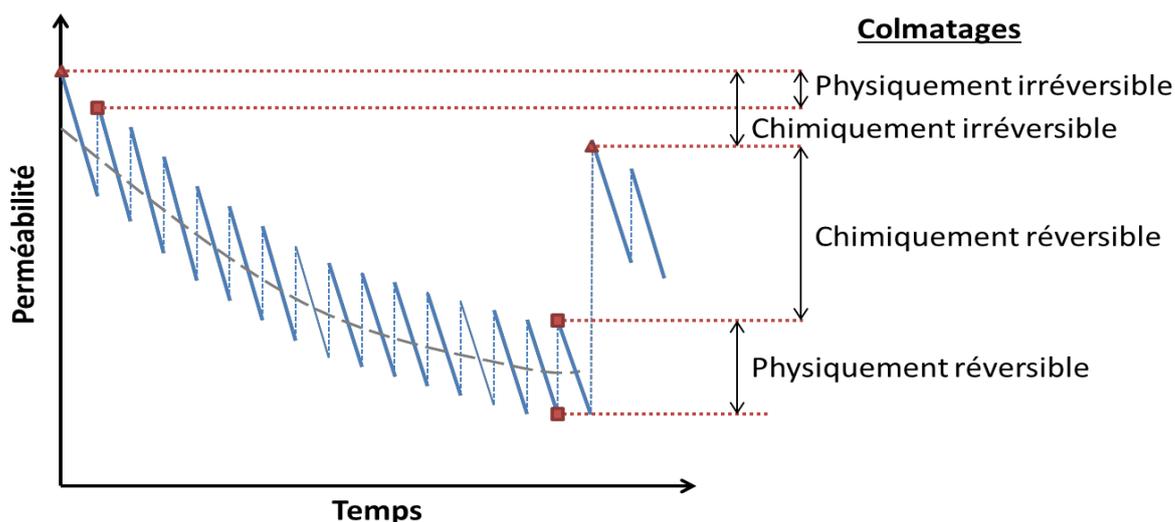


Figure I.5 : Représentation des différents types de colmatage

I.6.5.2. Origines et mécanismes de colmatage Il existe quatre catégories de colmatage

- Minéral
- Colloïdal
- Organique
- Biologique

Le colmatage d'une membrane peut résulter soit de l'obstruction des pores à l'intérieur même de la membrane (colmatage en profondeur), soit de phénomènes d'adsorption, soit enfin d'un dépôt de matière par convection.

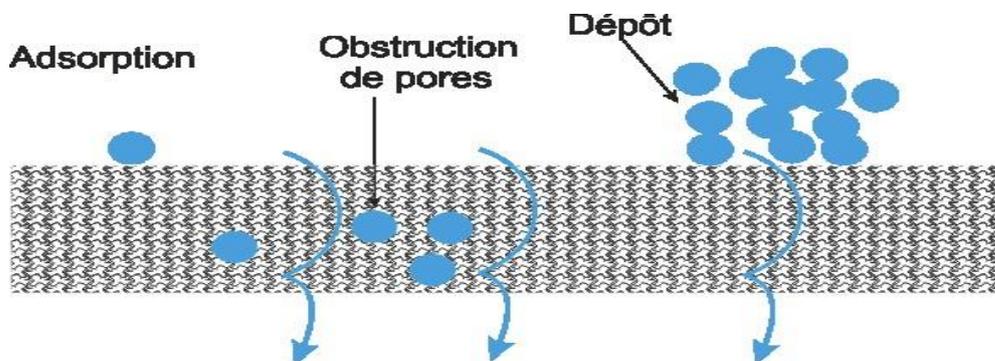
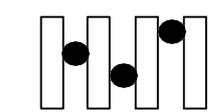
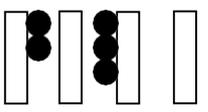
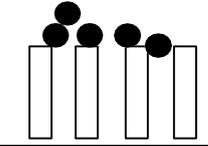
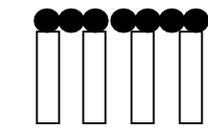


Figure I.6 : Représentation schématique des différents mécanismes de colmatage [35].

En filtration frontale, le tableau ci-dessous résume les différentes lois pour caractériser les différentes étapes allant du blocage de pores à la formation d'un dépôt: le blocage complet, le blocage standard, le blocage intermédiaire puis la filtration sur gâteau.

Tableau I.4 : Les différentes lois pour caractériser les différentes étapes allant du blocage de pores à la formation d'un dépôt [37].

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Modèle	Représentation	Phénomène	Equation
Blocage complet		La taille des particules est égale à la taille des pores	$V = J_0 \times (1 - \exp(-k \times t))$ k : constante de filtration du blocage complet
Blocage standard		La taille des particules est légèrement inférieure à celle des pores. Elles passent à travers les pores.	$\frac{t}{V} = \frac{k}{2} \times t + \frac{1}{J_0}$ k : constante de filtration du blocage standard
Blocage intermédiaire		Les particules bouchent les pores et s'accumulent sur d'autres particules. C'est le phénomène d'adsorption.	$k \times V = \ln(1 + (k \times t \times J_0))$ k : constante de filtration du blocage intermédiaire
Filtration sur gâteau		La taille des particules est supérieure à la taille des pores. Elles se déposent à la surface de la membrane.	$\frac{t}{V} = \frac{k}{2} \times V + \frac{1}{J_0}$ k : constante de filtration du gâteau

Avec :

J_0 : Flux initial à travers le média propre ($m \cdot s^{-1}$)

t : Temps de filtration (s)

V : Volume de perméat (m^3)

$\frac{t}{V}$: en ($s \cdot m^{-3}$)

Ensuite, le flux d'un solvant à travers la membrane est décrit par la loi de Darcy, où le flux est proportionnel à la pression transmembranaire :

$$J = \Delta P / \mu (20^\circ\text{C}) R_m$$

Avec :

J : flux du perméat ($\text{L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) ;

ΔP : pression transmembranaire (Pa) ;

$\mu (20^\circ\text{C})$: viscosité de l'eau à 20°C (Pa.s) ;

R_m : résistance de la membrane (m^{-1}).

Lors d'une opération de filtration membranaire, une résistance supplémentaire R_c (m^{-1}) s'ajoute à la résistance de la membrane lorsqu'apparaît un phénomène de colmatage. Le phénomène est décrit par la loi des résistances en série

$$J = \Delta P / \mu (20^\circ\text{C}) (R_m + R_c) = J_0 R_m / (R_m + R_c)$$

I.6.5.3. Polarisation de concentration

Sous l'effet de la pression transmembranaire, solutés et solvants sont transportés vers la membrane par convection. Le phénomène de polarisation de concentration est lié à l'accumulation de solutés au voisinage de la membrane sous l'effet du flux de solvant. L'accumulation de solutés génère un gradient de concentration et un flux de rétrodiffusion proportionnel au gradient de concentration qui est créé en opposition au flux convectif (Figure 7).

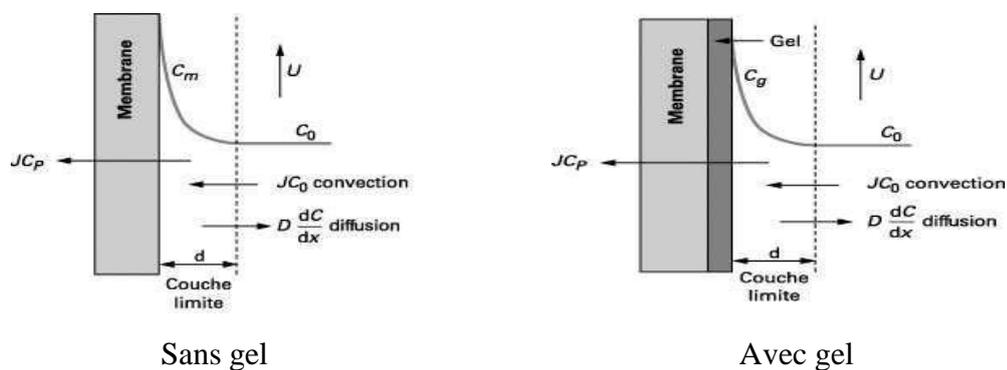


Figure I.7 : Principe du phénomène de polarisation de concentration en absence ou en présence de gel [36].

On note que, un gel peut se former en présence d'une forte concentration en macromolécules ou un dépôt en présence de colloïdes, lorsque la concentration devient très élevée [36].

I.6.5.4. Indices et modèles de prédiction du colmatage

Différents indices de colmatage sont utilisés pour caractériser et prédire le pouvoir colmatant d'une eau. Les indices le plus souvent utilisés sont le Silt Density Index (SDI) ou le Fouling Index (FI).

- Le Silt Density Index (SDI)

La détermination du SDI repose sur le mode opératoire suivant : un échantillon d'eau est filtré en mode frontal sur une membrane de porosité 0,45 µm et de diamètre 47 mm à une pression de 2,1 bars.

La valeur du SDI₁₅ (t = 15 min) se calcule suivant l'équation ci-dessous :

$$SDI = \frac{1 - \frac{t_1}{t_2}}{t}$$

Avec :

t₁ : Temps nécessaire pour filtrer un premier volume de 500 ml,

t₂ : Temps nécessaire pour filtrer un deuxième volume de 500 ml après les 15 premières minutes de filtration,

t : Temps total de filtration.

Si le colmatage est trop important, un SDI₅ (t = 5 min) ou SDI₁₀ (t = 10 min) peut être déterminé en réduisant le temps de filtration. Cet indice se détermine aisément mais il ne permet pas de caractériser les différents mécanismes à l'origine du colmatage. Il est essentiellement utilisé par les industriels pour prédire le colmatage des membranes d'osmose inverse et de nanofiltration [42].

-

- Le Modified Fouling Index (MFI)

Le MFI est déterminé à partir du tracé du rapport temps de filtration sur le volume filtré en fonction du volume filtré. Il permet de distinguer les différents mécanismes mis en jeu dans le colmatage : le blocage de pores, la filtration sur gâteau et la compression du dépôt.

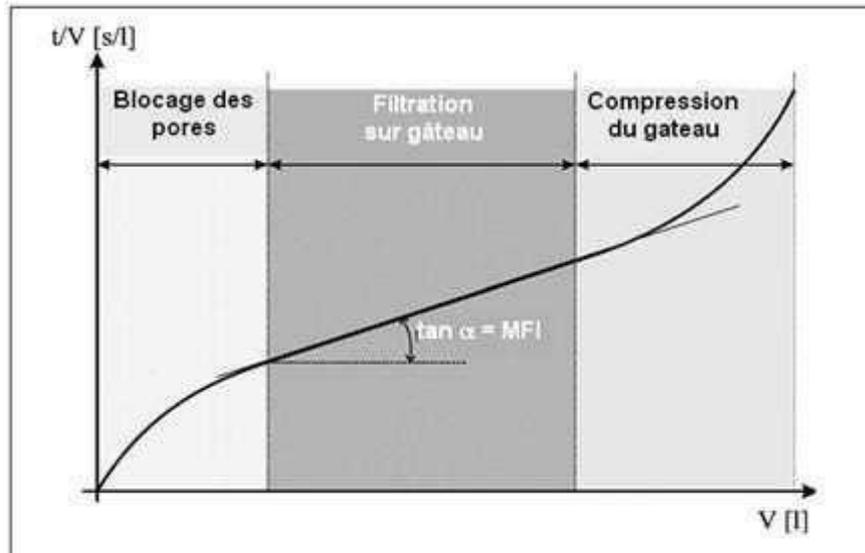


Figure I.8 : Représentation du rapport temps de filtration/volume filtré (t/V) en fonction du volume filtré V pour la détermination du MFI [40].

La valeur du MFI correspond à la pente de la partie linéaire où le colmatage est associé à une filtration de type gâteau :

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu R}{2 \Delta P A^2} + MFI \times V$$

Avec :

R : résistance de colmatage (m^{-1}),

A : la surface membranaire (m^2),

MFI : ($s.m^{-3}$).

I.6.5.5. Lutte contre le colmatage

La méthode la plus efficace de réduction d'un colmatage dépend de la nature du processus l'ayant généré. Il existe principalement trois méthodes pour lutter contre le colmatage :

- Prétraitement de la solution d'alimentation

Le traitement de la suspension en amont de la filtration est très utilisé pour diminuer son potentiel colmatant et augmenter ainsi les flux de perméation. Ce prétraitement visant à modifier les propriétés physicochimiques de la suspension peut être réalisé par le biais de méthodes mécaniques, biochimiques et/ou chimiques.

Par exemple : La coagulation comme prétraitement de la filtration membranaire,

Comme cela est expliqué ci-dessus, l'ajout d'un agent coagulant (ex. sel métallique) dans une eau de surface colorée génère des précipités qui vont englober et adsorber les particules et la matière organique colloïdale ou, encore, vont provoquer la précipitation des colloïdes organiques à des pH de 4,5 à 6,5. Cette coagulation de la matière organique peut être suivie d'une filtration sur membrane de MF ou d'UF.

- Modification des propriétés de la membrane

La nature chimique et la structure du matériau membranaire impactent fortement le comportement colmatant des suspensions à base de fruits, notamment par le biais de phénomènes d'adsorption. Les membranes sont généralement de nature organique ou inorganique (des matériaux hydrides organique inorganique existent également). Les matériaux organiques sont reportés comme étant plus sensibles au colmatage que les matériaux inorganiques. Cependant, le contrôle du colmatage n'est pas le seul argument à prendre en compte dans le choix du matériau membranaire, ce dernier étant également guidé par le coût des membranes et leur durée de vie.

- Amélioration des conditions opératoires

La maîtrise du colmatage membranaire pendant la filtration repose sur un choix adéquat de paramètres opératoires qui régissent l'hydrodynamique de la suspension à proximité de la membrane et conditionnent l'intensité des forces s'appliquant sur les entités en suspension. la formation et l'évolution du colmatage pendant la filtration dépend d'un subtil équilibre entre forces convectives et forces répulsives. Ainsi, l'impact des forces convectives sur le colmatage ne peut pas être considéré indépendamment de celui des forces répulsives, et vice versa [33].

CHAPITRE II
METHODES ET
TECHNIQUE
EXPRIMETALE

Ce chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, dimensionnement de l'extension de la station, description, la modélisation et la simulation de la filtration de l'eau brute par nano filtration.

II.1. Description de la zone d'étude

L'usine de production d'eau de la TICHY-HAF est la zone d'étude ici, qui se situe dans la région AKBOU Wilaya de BEJAIA.

II.1.1. Présentation du barrage de TICHY-HAF

Le barrage de TICHY-HAF est un barrage poids-voûte algérien situé dans le village de Mahfouda, commune de Bouhamza dans la wilaya de BEJAÏA dans la région de Kabylie en Algérie.

Sa réalisation a débuté dans la fin des années 1990 par l'entreprise HYDROTCHNIKA (Ex-Yougoslavie) mais elle a connu beaucoup de retard mais réalisé en grande partie par Cosider Travaux Publics. Mis en service en 2009, le barrage de TICHY-HAF produit 47 millions de mètres cubes par an destinés à l'alimentation en eau potable du couloir AKBOU-BEJAIA et 43 millions de mètres cubes par an pour l'irrigation. Il est composé essentiellement de quatre ouvrages, à savoir un barrage-voûte de 90 mètres de hauteur et d'une capacité de 80 millions de mètres cubes ; une station de traitement d'une capacité de 120 000 mètres cubes par jour ; une conduite d'eau traitée en B.P.A.T (béton précontraint avec âme en tôle) d'une longueur de 70 km et des réservoirs de stockage d'une capacité totale de 42 000 m³.

Le barrage est réceptionné en 2008. L'eau du barrage servira à l'irrigation des terrains agricoles ainsi qu'à l'approvisionnement des populations de la wilaya de BEJAÏA ainsi que celle des Wilaya limitrophes. Le raccordement des populations concernées en eau potable se poursuit toujours. [44]



Figure II.1: Situation géographique du barrage

II.2. Qualité de l'eau brute à traiter (retenue de TICHY-HAF)

Après notification de l'ordre de service et l'obtention des autorisations nécessaires AMENHYD a engagé le Laboratoire agréé Guerfa et Associés pour procéder aux prélèvements des échantillonnages et à effectuer les analyses d'eau brute nécessaires du Barrage TICHY-HAF.

Ces échantillonnages ont été basés sur le mode maintenu par l'APD et le DAO pour la prise d'eau brute, en effet les échantillons ont été pris à l'emplacement approximatif de la future barge flottante et cinq (5) niveaux ont été concernés par les prélèvements comme indiqué par le tableau n°1:

Tableau II.1 : Différents niveaux de prise d'échantillon d'eau brute [19].

Prélèvement	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Profondeur	Plan d'eau	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m

➤ **Analyse physico-chimiques réalisées par AMENHYD.**

L'eau traitée produite dans la station projetée doit être conforme à la norme Algérienne, aux directives du Conseil des Communautés Européennes et aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé. Les résultats des différentes analyses physico-chimiques

CHAPITRE II METHODE ET TECHNIQUE EXPERIMENTAL

de l'eau brute du barrage de TICHY-HAF ainsi que les valeurs des diverses normes et directives d'eau potable y compris la norme Algérienne sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau II.2: Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau brute de barrage de TICHY-HAF [12].

Parameters	Unite	Eau brute			Normes et directives	
		(Amenhyd)	(APD)	(ANRH)	OMS	Alg
Temperature	°C	15	14,00	17.1		
pH		7,8	7,80	7.69	8	6,5 à 9
Conductivity	µS/Cm	784	1063,00	1370		2800
Turbidity	NTU	<0,1	1,00	2.33	5	5
MES	mg/l	1.5	7,20	--		
Residue sec	mg/l	895	--	970		1500
TA	mg CaCO ₃ /l	0	00	00		
TAC	mg CaCO ₃ /l	275	417,00	321.00		500
Carbonate (CO ₃ ²⁻)	mg/l	0,01	0	0		
Bicarbonate(HCO ₃ ⁻)	mg/l	168	250	193		
TH	°f	45,7				
TH	mg/l CaCO ₃	456,6				500
Calcium (Ca ²⁺)	mg/l CaCO ₃	217,5	283	265	250	200
Calcium (Ca ²⁺)	mg/l	87	113	106	100	
Magnesium (Mg ²⁺)	mg/l	58,23	50	53		
Potassium (K ⁺)	mg/l	3,5	2.5	3.4		12
Sodium (Na ⁺)	mg/l	98	85	99.8	200	200
Chlorure (Cl ⁻)	mg/l	190	76	119.3	250	500
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	mg/L	430	369	380.3	300	400
Nitrate (NO ₃ ⁻)	mg/l	10	6.4	3.43	50	50
Nitrite (NO ₂ ⁻)	mg/l	0,05	0.02	0.02	3	0,2
Fer (Fe)	µg/l	<40	<50	--	300	300
Manganese (Mn)	µg/l	<50	<50	--	50	50
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/l	0,1	<0.1	0.06	1,5	0,5
Ortho phosphate (P)	mg/L	2	0.05	0.13		5
Chlore residual	mg/L	--	1.80	--		5
Aluminum (Al ³⁺)	mg/L	<50	0.02	--	0.200	0.20
Oxygen	(% Saturat)	7	44.70	--		
Matière organique	(mg O ₂ /l)	--	0.4	--		5

D'après les résultats de l'analyse de l'eau brute issue du barrage de Tichy-haf qui figurent dans les différents rapports d'analyse (les analyses effectuées par AMENHYD et par l'ANRH, et dans l'APD), nous constatons que le seul problème sérieux qui présente cette eau est la teneur élevée en sulfates alors que le reste des paramètres sont acceptables voir idéale pour le cas de la turbidité des eaux brutes. Le second problème relatif à la qualité d'eau brute est la dureté qui

CHAPITRE II METHODE ET TECHNIQUE EXPERIMENTAL

est relativement élevée mais la dureté de cette eau est acceptable dans l'ensemble et elle ne présente aucun problème tout en se référant aux différentes normes internationales [12].

➤ **Analyse bactériologiques réalisées par AMENHYD**

Tableau II.3 : Résultats des analyses bactériologiques de l'eau brute de barrage de TICHY-HAF [19].

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4	Echantillon 5	Norme	References
Germe aérobie mésophile à 22°C/ml	20	40	10	70	70	ISO19458	Journal officielle n° 35 du 24/01/1998
Germe aérobie mésophile à 37°C/ml	10	100	50	200	100		
Coliformes totaux / 100 ml	30	40	70	70	40	N.A-6360- 1994	
Coliformes fécaux / 100 ml	10	20	30	30	20		
Escherichia coli (E. coli) / ml	03	02	10	Abs	abs	ISO19458	
streptocoque fécaux / 250 ml		02	04	03	10	Rodier analyse microbiologique de l'eau	
Chlostridium S/R à 46 °C / ml	04	08	04	10	08		
Vibrio cholérique	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs		
Pseudomonase	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs		

Les résultats microbiologiques (pour les germes recherchés) sont acceptables pour une qualité d'eau brute à traiter. Généralement on peut accepter des valeurs plus élevées de l'ordre des centaines de colonies pour une eau brute destinée à l'alimentation d'une station de traitement sauf que pour le germe de Salmonelle qui doit être absent [19].

II.3. Description de la nouvelle station de traitement du barrage TICHY-HAF

L'ancienne station de TICHY-HAFF AKBOU a une capacité de production d'eau 120000 m³ par jour. La production d'eau de la nouvelle station est de 100000 m³ par jour, permettant ainsi une production de 220 000 M³/ J. D'après les résultats de l'analyse de l'eau brute issue du barrage de TICHY HAF qui figurent dans les différents rapports d'analyse (les analyses effectuées par l'ANRH et la campagne d'analyse réalisée par AMENHYD ...) nous constatons que cette eau de barrage présente une teneur élevée en sulfates, et une dureté qui est la limite de la concentration admissible. La nanofiltration est préconisée pour l'abaissement des concentrations des sulfates et de la dureté, précédée d'une déminéralisation par l'eau prétraité par ultrafiltration.

L'objectif principal est de concevoir l'usine de traitement de l'eau. Après application de nanofiltration, le mélange des deux sources d'eau :

- ✓ l'ancienne station
- ✓ nouvelle station.

Après examen des résultats d'analyse AMENHYD s'engage à présenter les solutions techniques permettant à la station projetée de produire une eau conforme aux normes algériennes.

Il s'agit du maintien de la solution contractuelle suivi d'une étape de nano filtration (aération - coagulation - floculation - décantation- Ultrafiltration – Nano filtration) avec toutes les améliorations jugées nécessaires au niveau de l'ancienne station (voir schéma ci- dessous).

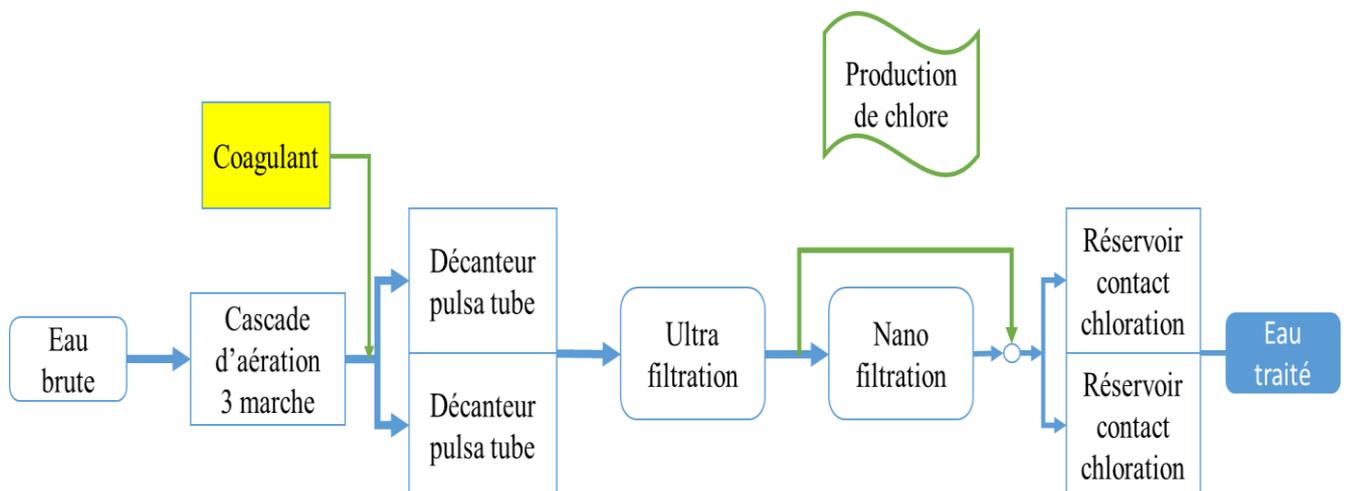


Figure II.2 : Processus de la station de traitement de TICHY-HAF 2

Le procédé définitif de traitement proposé par AMENHYD est comme suit :

- Aération sur cascade.
- Pré-oxydation à l'hypochlorite de sodium.
- Coagulation.
- Injection de CAP en cas de nécessité.
- Décantation.
- Ultrafiltration avec modules à fibre creuse.
- Nano-filtration (pour 50% de la production totale).
- Correction de pH par l'ajout de la soude.
- Désinfection finale à l'hypochlorite de sodium.

II.4. Description de la station de nano-filtration

L'unité de la nano filtration sera alimentée directement de l'eau provenant de l'unité d'ultrafiltration.

Installation proposé par group AMNHEYED Dix racks de nano filtration, chacun est constitué des étages série- rejets.

La production totale de permeat par ligne est 10000 m³/jour et la production journalière de la station est 100000 m³/jour.

Deux membranes commerciales de nano filtration sont proposées pour équiper l'unité de nano filtration ESNA1-LF2-LD fournie par HYDRAUNAUTICS et NF270-400/34i fournie par DOW.

II.5. Le Choix des membranes pour la simulation

Les membranes étudiées sont de deux types :

- Membrane de nano filtration ESNA1-LF2-LD (HYDRAUNAUTICS).
- Membrane de nano filtration NF270-400/34i (DOW).

CHAPITRE II METHODE ET TECHNIQUE EXPERIMENTAL

L'objectif principal était de concevoir l'usine de traitement de l'eau. Après application de nano filtration, l'eau arrivait dans la gamme de qualité réutilisable. On va comparer les performances de deux membranes commerciales de nanofiltration ESNA1-LF2-LD (HYDRAUNAUTICS) et NF270-400/34i (DOW) sur la filtration de l'eau brute par rapport l'énergie spécifique, la concentration des sulfates, la dureté, TDS (total dissolved solide) avec différentes configurations.

La conception des unités nanofiltration permet de comprendre la méthodologie de conception appliquée par les logiciels commerciaux.

La plupart des fabricants de membranes nano filtration, comme HYDRANAUTICS (IMS Design), DOW (WAVE), disposent de logiciels de simulation permettant de concevoir rapidement des projections pour leurs membranes et systèmes.

II.5.1. Caractéristiques des membranes de nanofiltration selon les fournisseurs

Considérant que depuis de nombreuses années, la plupart des fabricants de nano filtration ont leur propre directives de conception l'expérience, les caractéristiques de leurs membranes.

Tableau N II.4: Caractéristiques des membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400.

Membrane	ESNA1-LF2-LD	NF270-400/
Fournisseur	HYDRAUNAUTICS	DOW
Température maximum	45 °C	45 °C
Pression maximum	1.034 bar	1.034 bar
pH de fonctionnent	2-10	3-10
Taux de rejet	85%	95 %
Surface active	37.2 m ²	37 m ²

II.5.2. Logiciels IMSDesign

L'IMSDesign (Integrated Membrane Solutions Design) est la dernière version du logiciel de projection de membrane HYDRANAUTICS, un outil de dimensionnement avancé créé pour répondre aux besoins les plus exigeants des professionnels de l'industrie des membranes.

Dans notre dernier logiciel de dimensionnement IMSDesign, la sophistication rencontre la simplicité. Ce programme est l'un des outils les plus avancés et les plus puissants, développé à l'aide de la technologie .NET de Microsoft, offre des fonctionnalités de programme améliorées, des graphiques considérablement améliorés pour aider le concepteur RO/NF et comprend de nombreuses nouvelles fonctionnalités qui améliorent la capacité de l'utilisateur à concevoir rapidement et avec précision. Analyser les systèmes à membrane. L'interface utilisateur multilingue prend en charge nos clients et partenaires mondiaux.

Alors que la demande de données opportunes et pertinentes continue de croître, HYDRANAUTICS et NITTO s'engagent à fournir à leurs clients le logiciel de projection membranaire le plus avancé et le plus précis.

II.5.3. Logiciels WAVE

Le traitement de l'eau nécessite souvent plus d'une technologie pour atteindre la qualité souhaitée. La plupart des logiciels de conception de stations d'épuration ne vous permettent pas d'optimiser des systèmes à technologies multiples, nécessitant un logiciel séparé et plus de temps pour la configuration et la gestion.

Notre Water Application Value Engine (WAVE) est le premier logiciel de modélisation entièrement intégré de l'industrie à intégrer trois des technologies de pointe - l'ultrafiltration (UF), l'osmose inverse (RO) et l'échange d'ions (IX) - dans un seul outil complet. À l'aide d'une interface commune, il simplifie le processus de conception et permet finalement de réduire le temps nécessaire à la gestion de votre système de traitement de l'eau.

II.5.4. La Variation de taux de conversion

Les logiciels utilisés dans la simulation ont donné un seul taux de conversion, pour l'étude de différents paramètres de la performance en fonction de taux de conversion python a utilisé.

II.5.4.1. Le Langage Python

Python est un langage de programmation (au même titre que le C, C++, fortran, java ...), développé en 1989. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- «open-source» : son utilisation est gratuite et les fichiers sources sont disponibles et modifiables ;

- simple et très lisible
- doté d'une bibliothèque de base très fournie.
- importante quantité de bibliothèques disponibles : pour le calcul scientifique, les statistiques, les bases de données, la visualisation.
- grande portabilité : indépendant vis à vis du système d'exploitation (linux, Windows, MacOS) ;
- orienté objet ;
- typage dynamique : le typage (association à une variable de son type et allocation zone mémoire en conséquence) est fait automatiquement lors de l'exécution du programme, ce qui permet une grande flexibilité et rapidité de programmation, mais qui se paye par une surconsommation de mémoire et une perte de performance ;
- présente un support pour l'intégration d'autres langages [47].

II.5.4.2. Le module matplotlib

Présentons matplotlib il s'agit sûrement de l'une des bibliothèques python les plus utilisées pour représenter des graphiques en 2D. Elle permet de produire une grande variété de graphiques et ils sont de grande qualité. Le module pyplot de matplotlib est l'un de ses principaux modules. Il regroupe un grand nombre de fonctions qui servent à créer des graphiques et les personnaliser (travailler sur les axes, le type de graphique, sa forme et même rajouter du texte). Avec lui, nous avons déjà de quoi faire de belles choses [48].

II.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire la lumière sur le mode expérimental concernant notre étude ainsi que les appareils et les logiciels utilisés. Nous avons d'abord décrit la présentation de la zone d'étude, la qualité de l'eau traiter, les paramètres d'analyses, description et dimensionnement de la station et enfin la préparation des solutions nécessaires à nos essais.

CHAPITRE III

RESULTATS ET

DISCUSSIONS

III.1. Résultats de simulation

La simulation de nanofiltration proposée par le groupe AMENHYDE par logiciel IMSDesign est composée de dix trains de nanofiltration, chacun est constitué de trois étages en série-rejets. La production par train est de 417 m³/h de perméat. La ligne de production équipée avec 420 modules de nanofiltration en polyamide de type HYDRANAUTIC ESNA1-LF2-LD et 70 tubes de pression de 6 modules par tube. Les tubes de pression sont en GRP (Glass Reinforced Plastic) et sont conçus pour fonctionner à une pression de 20 bars (300 psi). Le taux de conversion global de 85%.

La simulation de nanofiltration est réalisée pour étudier les performances de la membrane vis à vis du calcium, du magnésium, et des sulfates.

Le tableau III.1, et la figure III.1 représentent respectivement la simulation effectuée.

Tableur III.1 : résultat de simulation proposée par AMENHYDE.

Ion (mg/l)	Eau brute	Eau alimentation	Impréger l'eau	Concentrat-1	Concentrat-2	Concentrat-3	Produit mélangé	Normes Algerian
Dureté en CaCO ₃	527,42	527,42	34,950	1309,1	2566,4	3333,8	303,57	
Ca ²⁺	129,00	129,00	10,223	319,0	622,6	805,9	75,01	
Mg ²⁺	50,00	50,00	2,291	124,8	246,4	321,9	28,31	
Na ⁺	114,00	114,00	24,693	270,1	501,8	623,0	73,41	200
K ⁺	5,00	5,00	1,632	11,4	20,3	24,2	3,47	12
NH ₄ ⁺	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00	0.5
Ba ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00	
Sr ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00	
H ⁺	--	--	--	--	--	--	--	
CO ₃ ²⁻	1,20	1,20	0,022	8,1	33,4	55,8	0,66	
HCO ₃ ⁻	260,00	260,00	40,969	615,7	1148,7	1432,3	160,69	
SO ₄ ²⁻	430,00	430,00	21,555	1072,3	2113,4	2757,6	244,34	400
Cl ⁻	80,00	80,00	23,255	184,8	333,3	403,5	54,21	500
Fe ²⁺	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00	300
NO ₃ ⁻	7,00	7,00	2,203	16,0	28,6	34,3	4,82	50
PO ₄ ³⁻	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00	

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

OH ⁻	0,00	0,00	0,001	0,0	0,0	0,0	0,00	
SiO ₂ ⁺	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00	
B ³⁺	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00	
CO ₂ ⁺	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	
NH ₃ ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
TDS	1076,20	1076,20	126,85	2622,35	5048,43	6458,41	644,92	
pH	7,90	7,90	7,14	8,25	8,49	8,58	7,70	6,5 à 9

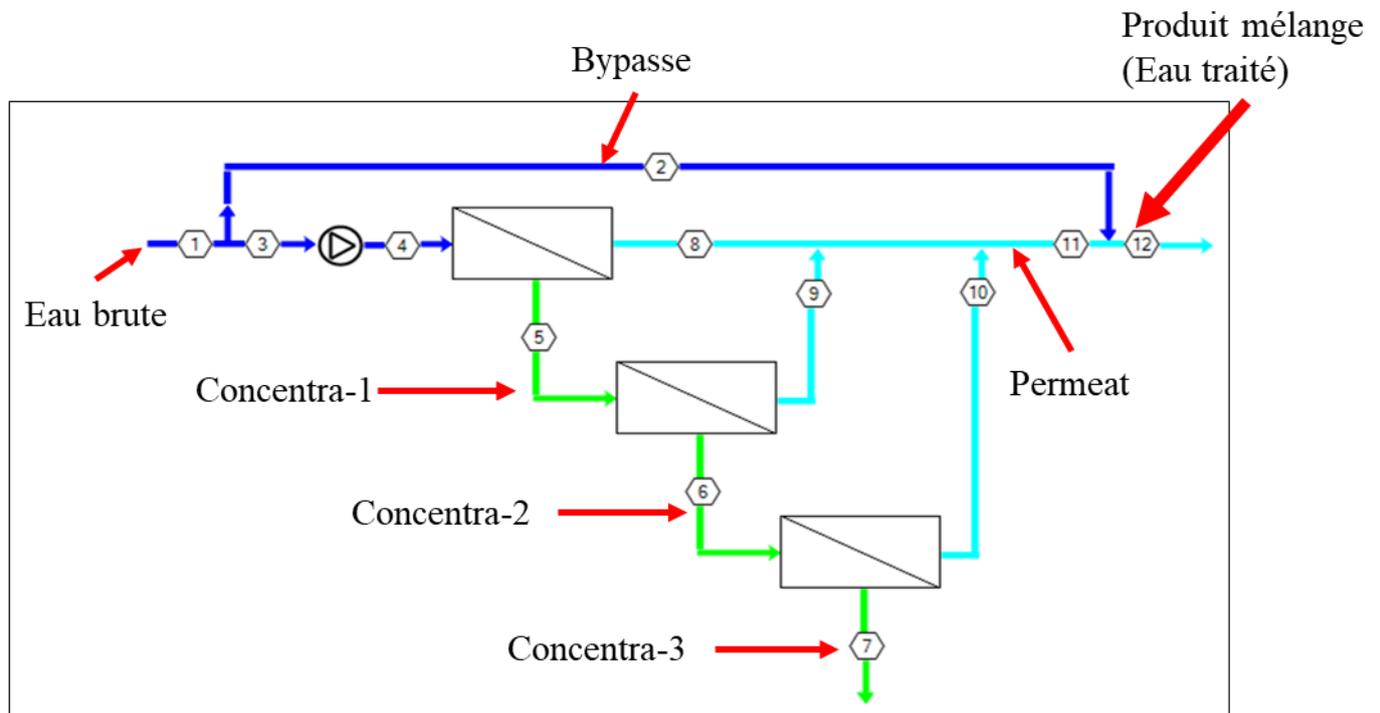


Figure III.1: Design de nanofiltration par IMSDesign avec 3étages et 70tubes de pression sans recyclage

Flux	Débit (m3/h)	Pression (bar)	TDS (mg/l)	pH	Conductivité électrique (µs/cm)
1	990	0	1076		1878
2	500	0	1076		1878
3	490	0	1076		1878
4	490	6,90	1076		1878
5	194	5,90	2622		4161
6	96,8	4,93	5048		7581
7	73,2	3,81	6458		9540

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

8	296	0	60,3		103
9	97,1	0	202		343
10	23,6	0	653		1156
11	417	0	127		216
12	917	0	645		1200

Les résultats obtenus font apparaître clairement la possibilité diminuée des ions calcium, magnésium et sulfates avec une efficacité supérieure à 50% avec énergie spécifique 0,28kwh/m³. La qualité de l'eau traitée est une eau destinée à la consommation humaine obéissant aux normes algériennes. La configuration retenue et qui sera exécutée dans la station de traitement de barrage TECHY-HAF correspond à une nanofiltration avec 3 étages et 70 tubes.

III.2. Expertise et optimisation de la configuration retenue

Afin d'évaluer les performances et le choix de la configuration optimale, des essais de simulation en utilisant d'autres types de membranes et les variantes sans et avec recyclage par rapport au choix effectué par AMENHYD (3 étages, sans recyclage, 70 tubes de pression), le choix s'est porté sur NF270-400/34i (DOW). Trois types de simulation sont envisagés par l'outil de simulation WAVE.

Les configurations du procédé de nanofiltration considéré est comme suit :

- Trois étages avec 70 tubes de pression sans recyclage.
- Deux étages avec 70 tubes de pression avec recyclage.

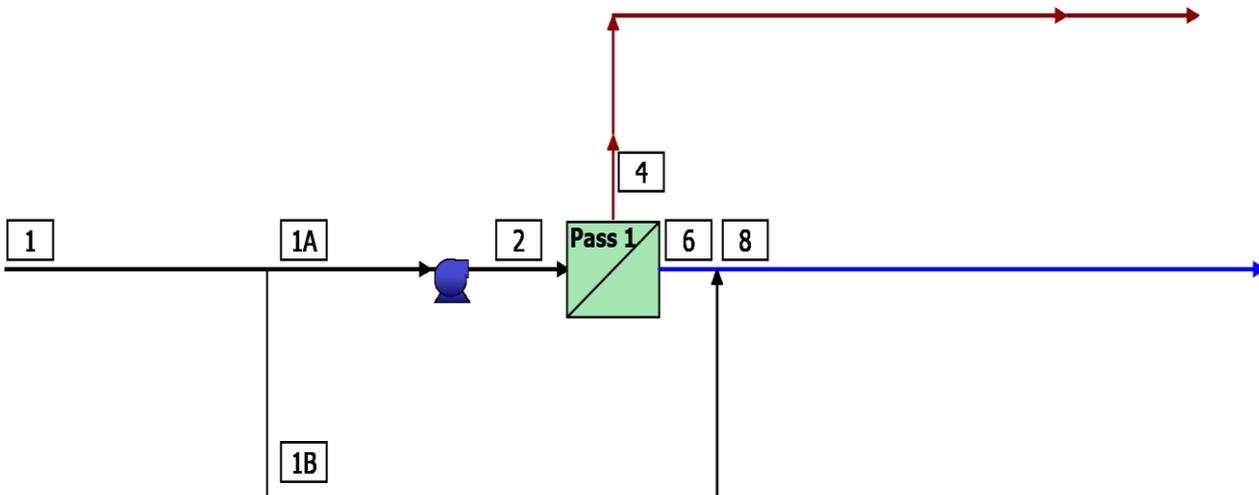
La membrane retenue en analysant les fiches techniques du fabricant DOW, adaptée à la qualité de l'eau du barrage TICHY-HAF est la NF270-400/34i avec différents taux de conversion (85%, 75%, 65%, et 55%).

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.2.1. La simulation par logiciel WAVE

Tableur III.2 : résultat de simulation Trois étages avec 70 tubes de pression sans recyclage.

Concentrations(mg/Lasion)									
	Alimentation	Concentrate			Permeate				
		Etage1	Etage 2	Etage 3	Etage 1	Etage 2	Etage3	Total	By pass
NH₄⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K⁺	5.01	7.97	10.26	10.65	2.40	3.73	5.43	2.80	3.88
Na⁺	114.2	180.1	230.9	239.7	56.19	85.58	122.7	65.00	89.15
Mg²⁺	50.09	98.63	143.7	152.6	7.33	14.97	33.13	9.89	29.62
Ca²⁺	129.2	246.5	352.7	373.4	25.96	49.12	96.29	33.47	80.46
Sr²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO₃²⁻	2.44	5.51	9.48	11.81	0.50	0.91	0.79	0.57	1.28
HCO₃⁻	260.0	410.2	499.9	502.6	126.2	237.9	424.0	161.2	210.1
NO₃⁻	7.00	6.59	5.76	5.56	7.36	8.13	8.27	7.56	7.29
Fe²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl⁻	80.00	95.55	97.06	95.28	66.31	92.72	118.9	74.01	76.95
Br⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO₄²⁻	430.0	900.2	1,364	1,464	15.81	39.64	122.2	24.62	223.6
PO₄³⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO₂	3.79	4.80	4.56	3.76	3.46	7.27	29.29	5.12	4.32
TDS	1,078	1,951	2,713	2,855	308.0	532.7	931.6	379.1	722.3
Cond. μS/cm	1,657	2,874	3,891	4,084	474	782	1,311	573	1,120
pH	7,9	8,0	8,0	8,1	7,7	7,6	7,2	7,6	7,8



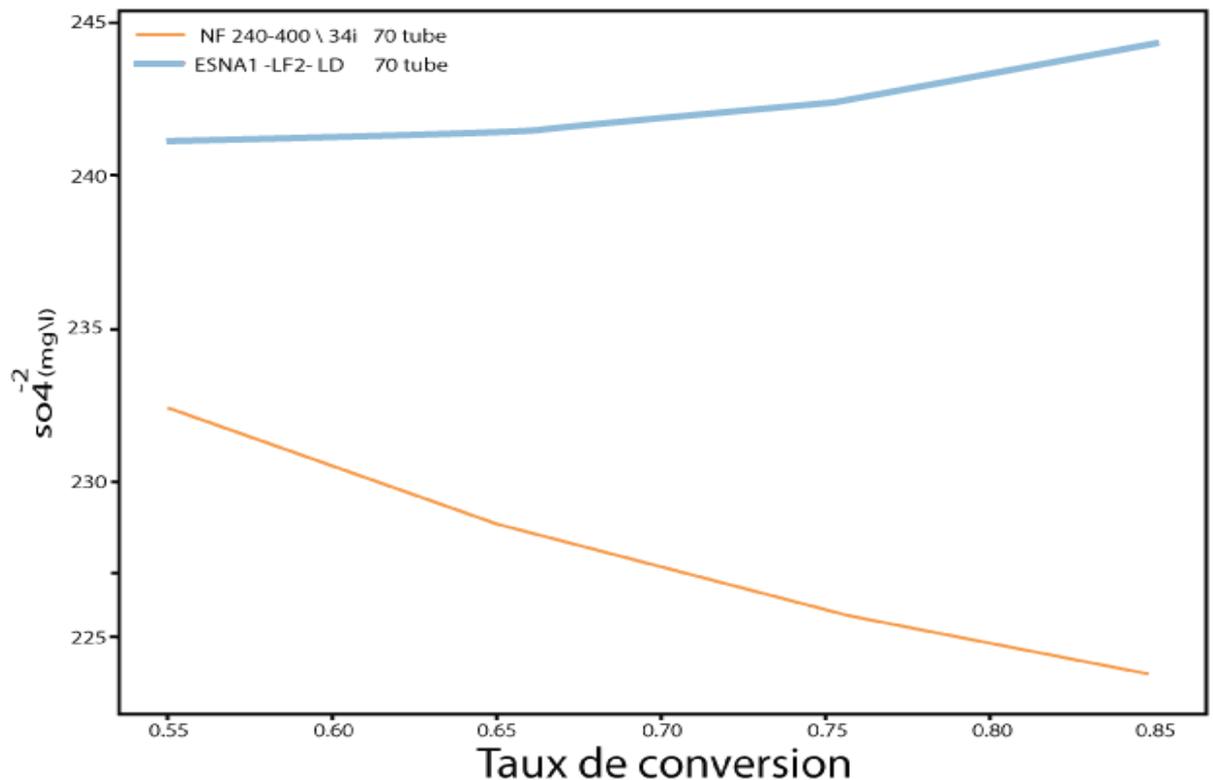
#	Description	Flow (m ³ /d)	TDS (mg/L)	Pression (bar)
1	Eau brute au système NF	26395	1078	0,0
1A	Alimentation vers Pass1 après bypass	15597	1078	0,0
1B	Bypass de Pass1 alimentation à Pass1 Permeate	10798	1078	0,0
2	Alimentation nette vers Pass1	15593	1078	5,0
4	Concentrate total de Pass1	4393	2855	0,0
6	Produit net du système NF	11204	379.1	0,0
8	Mélange de Pass1 Permeate et Bypass Pass1 alimentation	22,002	722,3	0,0

Figure III.2 : Design de nanofiltration par WAVE avec Trois étages et 70 tubes sans recyclage

III.2.2. Performance de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes de pression sans recyclage

III.2.2.1. Réduction de la concentration des sulfates

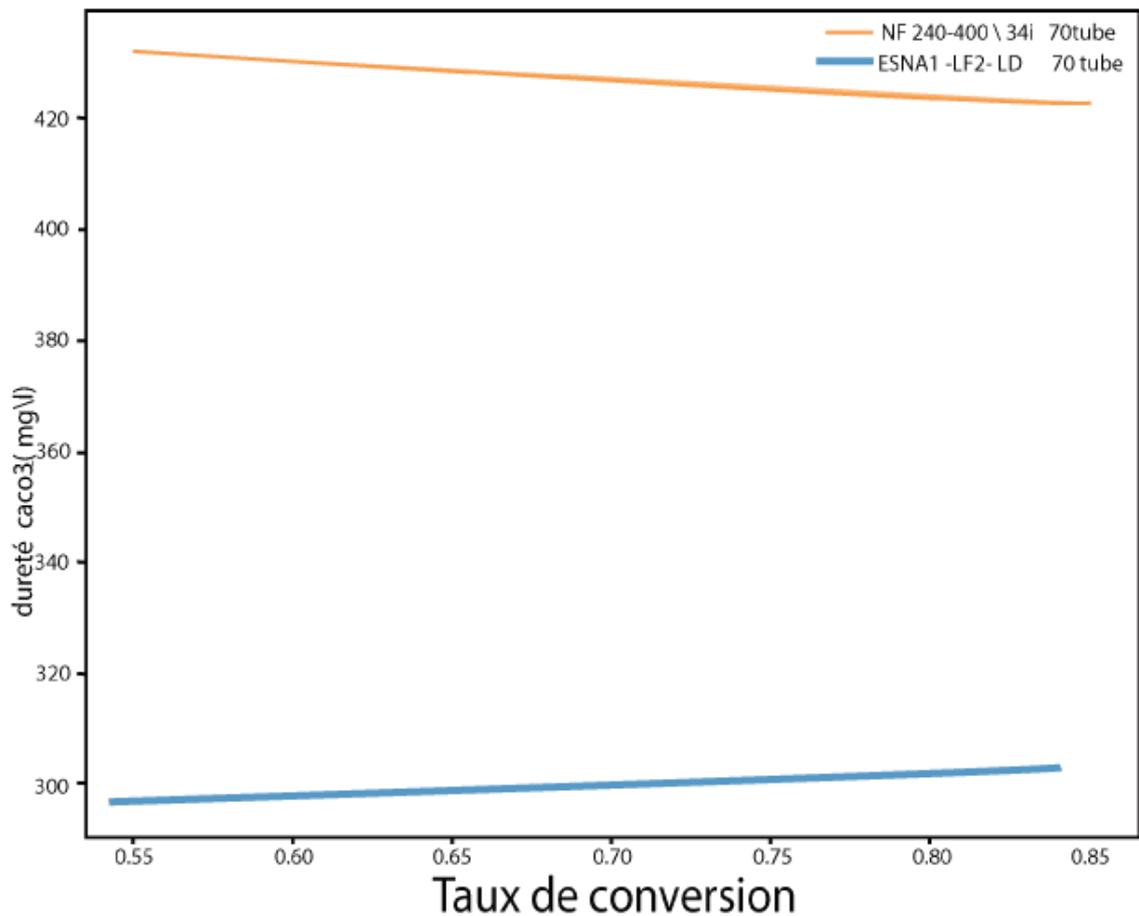
La figure III.3 montre l'évolution de la concentration des sulfates sous différents taux de conversion. Pour la membrane ESNA1-LF2-LD, la concentration en sulfates augmente avec l'augmentation du taux de conversion. En revanche la concentration des sulfates diminue pour la membrane NF270-400/34i. Il est à noter que pour tous les taux de conversions retenues les deux membranes sont sélectives par rapport aux ions sulfates, à des concentrations inférieures à la norme Algériennes vis-à-vis des sulfates. Par conséquent, la membrane NF270-400/34i, est plus performante vis-à-vis de la rétention des sulfates par rapport à la membrane ESNA1-LF2-LD choisie par AMENHYD. La sélectivité de cette membrane est d'autant plus importante que le taux de conversion est important.



La figure III.3 : L'évolution de la concentration des sulfates sous différents taux de conversion de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes.

III.2.2.2. Réduction de la dureté totale

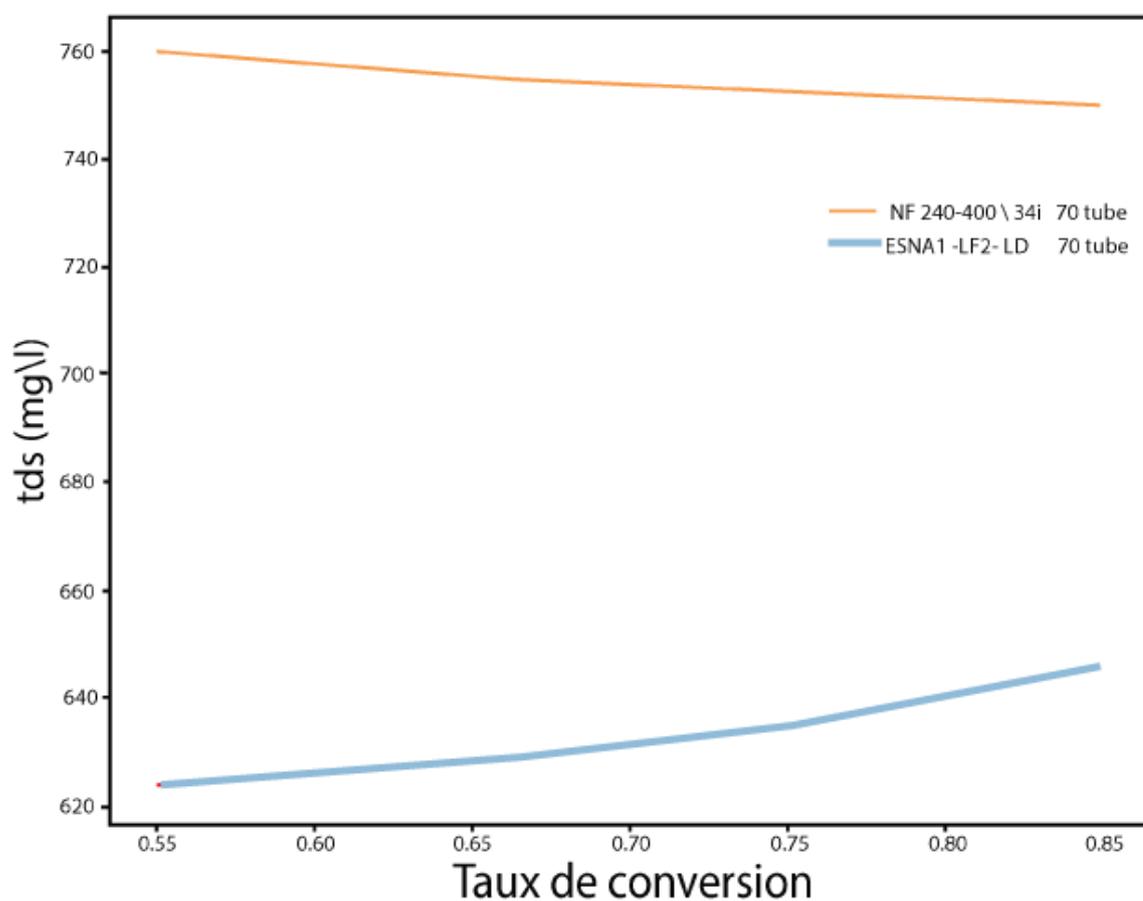
La figure III.4 montre l'évolution de la dureté totale sous différents taux de conversion. Pour la membrane ESNA1-LF2-LD la concentration en dureté total augmente avec l'augmentation du taux de conversion .et pour la membrane NF270-400/34i la concentration diminue en restant toujours inférieure à la norme Algérienne. Il apparait que, la membrane ESNA1-LF2-LD est plus performante vis-à-vis de la dureté, sa sélectivité est meilleure que celle observée pour la membrane NF270-400/34i.



La figure III.4 :L'évolution de la dureté totale sous différents taux de conversion de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes.

III.2.2.3. Réduction du TDS

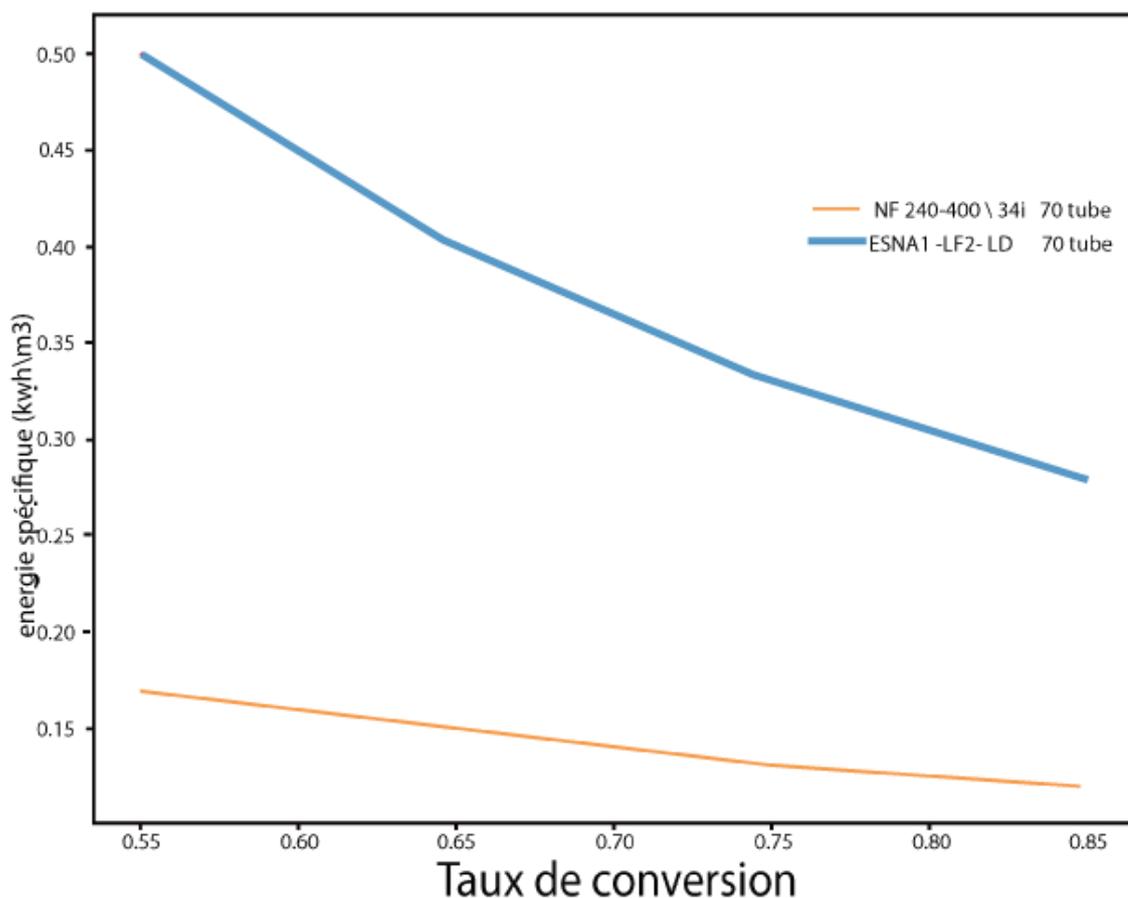
La figure III.5 montre l'évolution du TDS en fonction des différents taux de conversion pour les deux membranes retenues. La membrane ESNA1-LF2-LD est nettement plus sélective vis-à-vis des sels présents dans les eaux du barrage TIHY-HAFF que la membrane NF270-400/34i.



La figure III.5 :L'évolution du TDS en fonction des différents taux de conversion de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes.

III.2.2.4. L'énergie spécifique

La figure III.6 représente la variation de l'énergie spécifique en fonction des taux de conversion. Il apparait que dans des conditions comparables, la membrane NF270-400/34i est nettement plus faible que l'énergie spécifique du procédé utilisant la membrane ESNA1-LF2-LD. L'énergie spécifique est un paramètre de choix dans cette opération unitaire.



La figure III.6 : La variation de l'énergie spécifique en fonction des taux de conversion de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes.

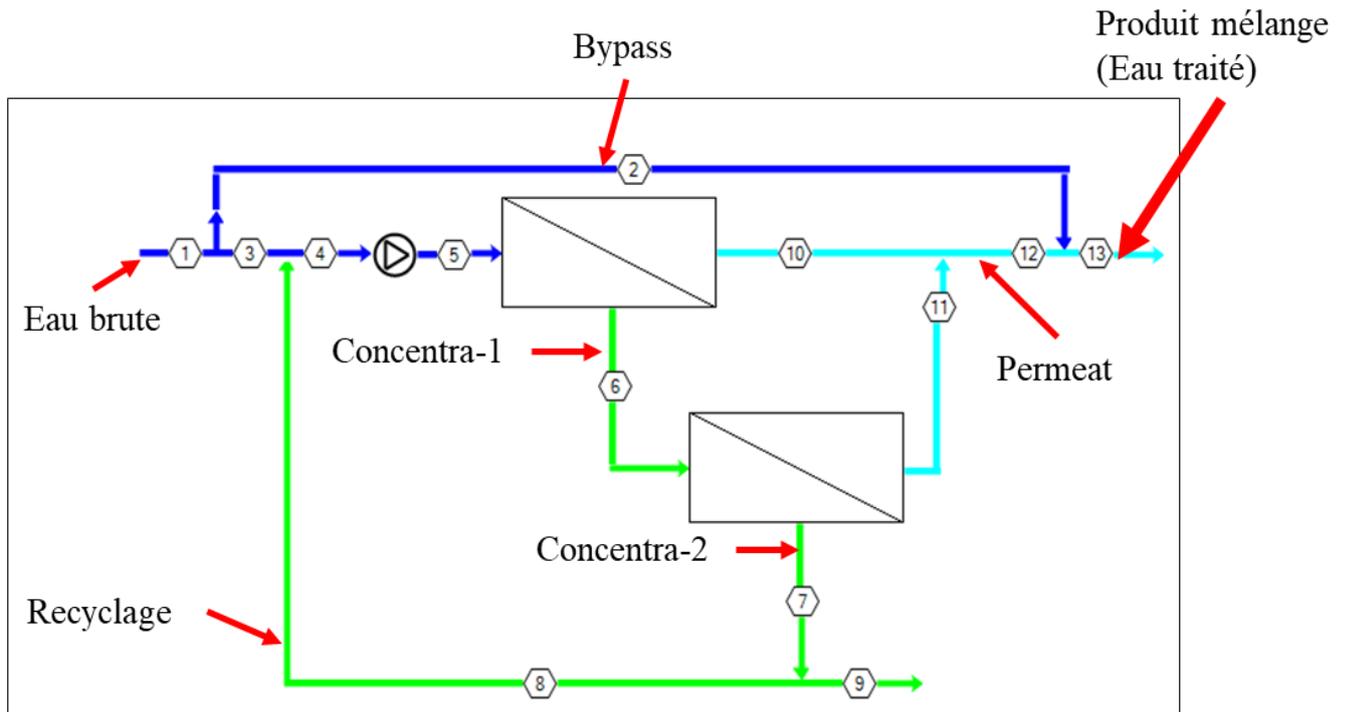
III.2.3. Performance de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec deux étages et 70 tubes de pression avec recyclage

III.2.3.1. La simulation par IMSDesign

Le tableau III.3 et la figure III.6 représentent respectivement la simulation effectuée dans 85% de taux de conversion.

Tableur III.3: résultat de simulation par IMSDesign avec deux étages et 70 tubes de pression avec recyclage

Ion (mg/l)	Eau brute	Eau alimentation	imprégner l'eau	Concentrat-1	Concentrat-2	Produit mélangé	Normes Algerian
Dureté, CaCO ₃	527,42	981,17	53,964	1825,0	3210,9	312,21	
Ca ²⁺	129,00	237,49	15,689	440,2	770,9	77,50	
Mg ²⁺	50,00	94,54	3,597	176,8	313,2	28,91	
Na ⁺	114,00	189,07	34,771	337,4	560,2	77,99	200
K ⁺	5,00	7,67	2,159	13,2	20,9	3,71	12
NH ₄ ⁺	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,00	0.5
Ba ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,00	
Sr ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,00	
H ⁺	--	--	--	--	--	--	
CO ₃ ²⁻	1,20	9,18	0,048	15,0	47,9	0,67	
HCO ₃ ⁻	260,00	448,34	59,260	804,6	1335,3	168,97	
SO ₄ ²⁻	430,00	813,04	33,710	1518,6	2687,2	249,87	400
Cl ⁻	80,00	127,61	31,712	222,7	358,3	58,05	500
Fe ²⁺	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,00	300
NO ₃ ⁻	7,00	10,99	2,967	19,0	30,3	5,17	50
PO ₄ ³⁻	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,00	
OH ⁻	0,00	0,01	0,001	0,0	0,0	0,00	
SiO ₂ ⁺	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,00	
B ³⁺	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,00	
CO ₂ ⁺	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	
NH ₃ ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
TDS	1076,20	1937,93	183,91	3547,56	6124,10	670,83	
pH	7,90	8,12	7,30	8,35	8,55	7,73	6,5 à 9



Flux	Débit (m3/h)	Pression (bar)	TDS (mg/l)	pH	Conductivité électrique (µs/cm)
1	990	0	1076		1878
2	500	0	1076		1878
3	490	0	1076		1878
4	590	0	1938		3179
5	590	8,45	1938		3179
6	312	6,99	3548		5495
7	174	5,90	6124		9102
8	100,0	0	6124		9102
9	73,5	0	6124		9102
10	278	0	119		202
11	139	0	315		537
12	417	0	184		314
13	917	0	671		1239

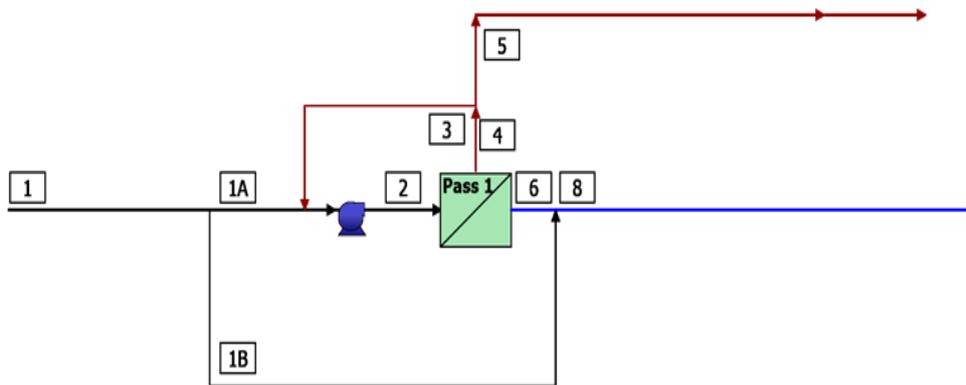
Figure III.7 : Design de nanofiltration par IMSDesign avec 2étages et 70tubesavec recyclage.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.2.3.2. La simulation par WAVE

Tableur III.4 : Résultat de simulation par WAVE avec deux étages et 70 tubes de pression avec recyclage

Concentrations (mg/L as ion)									
	Raw Feed	Adjusted Feed		Concentrate		Permeate			
		Initial	After Recycle	Stage1	Stage2	Stag1	Stage2	Total	With Bypass
NH₄⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K⁺	4.99	4.99	5.36	7.14	8.09	2.41	3.57	2.71	3.95
Na⁺	113.7	113.7	122.2	162.0	183.3	55.96	81.60	62.60	90.46
Mg⁺²	49.86	49.86	56.54	86.0 4	104.7	7.46	15.84	9.63	31.57
Ca⁺²	128.6	128.6	144.6	215.7	259.6	26.30	50.49	32.57	84.96
Sr⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO₃⁻²	0.31	0.31	0.36	0.69	0.87	0.06	0.21	0.09	0.19
HCO₃⁻	260.0	260.0	277.7	368.8	404.7	125.6	233.0	153.5	211.6
NO₃⁻	7.00	7.00	6.88	6.49	5.96	7.51	8.48	7.76	7.35
F⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl⁻	80.00	80.00	80.96	89.09	87.73	67.40	94.16	74.33	77.42
Br⁻¹	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO₄⁻²	430.0	430.0	497.7	787.1	985.6	16.26	40.59	22.57	244.8
PO₄⁻³	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO₂	30.14	30.14	30.10	30.07	29.90	30.31	30.88	30.46	30.26
TDS	1074	1074	1192	1723	2041	309.0	528.0	365.7	752.3
Cond. μS/cm	1,650	1,650	1,821	2,563	3,000	477	780	557	1,168
pH	7,0	7,0	7,0	7,1	7,2	6,8	7,0	6,8	6,9



#	Description	Flow (m ³ /d)	TDS (mg/L)	Pression (bar)
1	Eau brute au système NF	29332	1074	0.0
1A	Alimentation vers Pass1 après bypass	17333	1074	0.0
1B	Bypass de Pass1 alimentation à Pass1 Permeate	12000	1074	0.0
2	Alimentation nette vers Pass1	19728	1192	4.8
3	Recyclage du concentré du passage 1 au passage 1	2400	2041	1.1
4	Concentré total de la passe 1	9733	2041	1.1
5	Concentré net du système NF	7333	2041	1.1
6	Produit net du système NF	9999	365.7	0.0
8	Mélange de Pass1 Permeat et Bypass Pass1 alimentation	21999	752.3	0.0

Figure III.8 : design de nanofiltration avec 2 étages et 70 tubes avec recyclage par WAVE

III.2.3.3. Réduction de la concentration des sulfates

La figure III.9 montre l'évolution de la concentration des sulfates sous différents taux de conversion. Pour la membrane ESNA1-LF2-LD, la concentration en sulfates augmente avec l'augmentation du taux de conversion. En revanche la concentration des sulfates reste stable pour la membrane NF270-400/34i. Il est à noter que pour tous les taux de conversions retenues les deux membranes sont sélectives par rapport aux ions sulfates, à des concentrations inférieures à la norme Algériennes vis-à-vis des sulfates. Par conséquent, la membrane NF270-400/34i, est plus performante vis-à-vis de la rétention des sulfates par

rapport à la membrane ESNA1-LF2-LD choisie par AMENHYD. La sélectivité de cette membrane est d'autant plus importante que le taux de conversion est important.

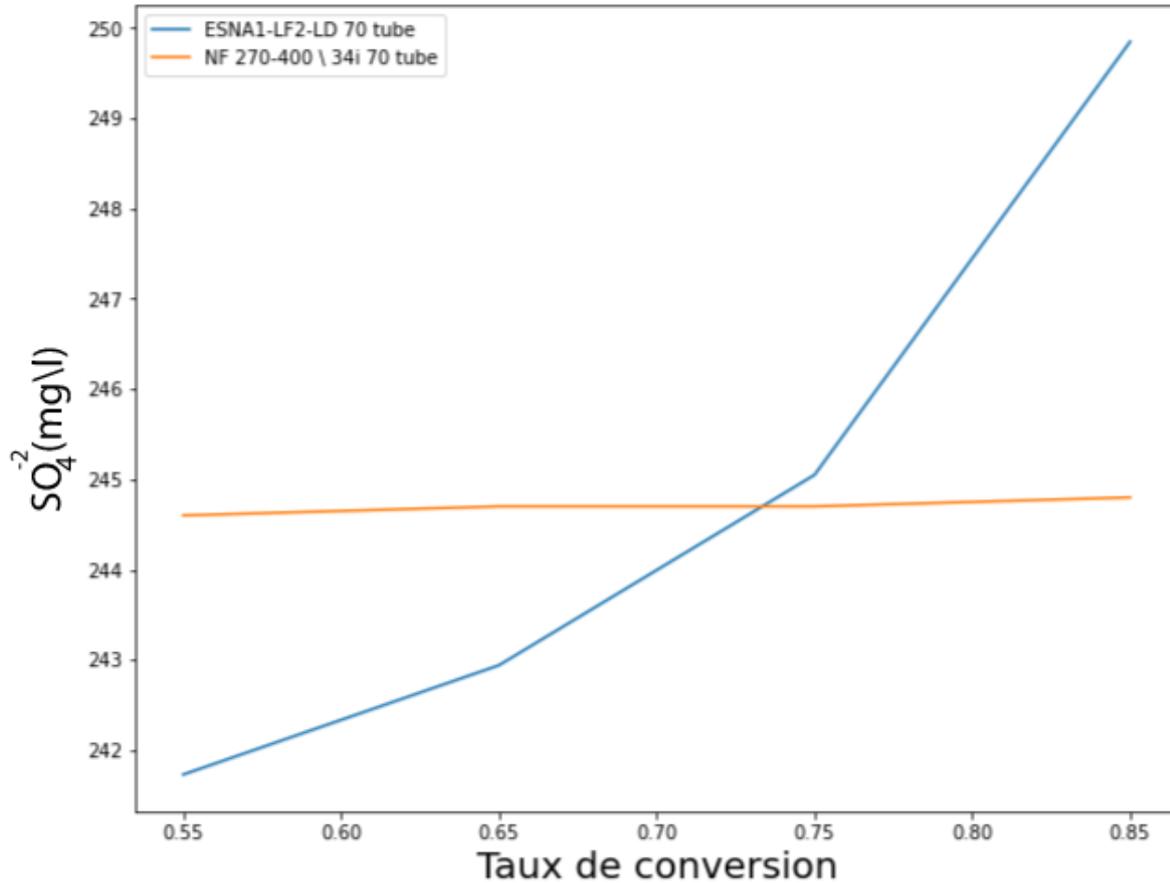


Figure III.9 : l'évolution de la concentration des sulfates sous différents taux de conversion, de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec Deux étages et 70 tubes avec recyclage

III.2.3.4. Réductions de la dureté totale

La figure III.10 montre l'évolution de la concentration en dureté totale sous différents taux de conversion. Pour la membrane ESNA1-LF2-LD Nous avons remarqué que la concentration en dureté totale augmente avec l'augmentation du taux de conversion. Et pour NF270-400/34i la concentration Dureté totale reste stable.

La concentration de la dureté totale avec différent taux de conversion et pour les deux membranes situées dans domaine des normes algérien elle ne dépasse pas.

Les courbes montrent que la concentration de la dureté totale donnée par la membrane ESNA1-LF2-LD est inférieure à NF270-400/34i.

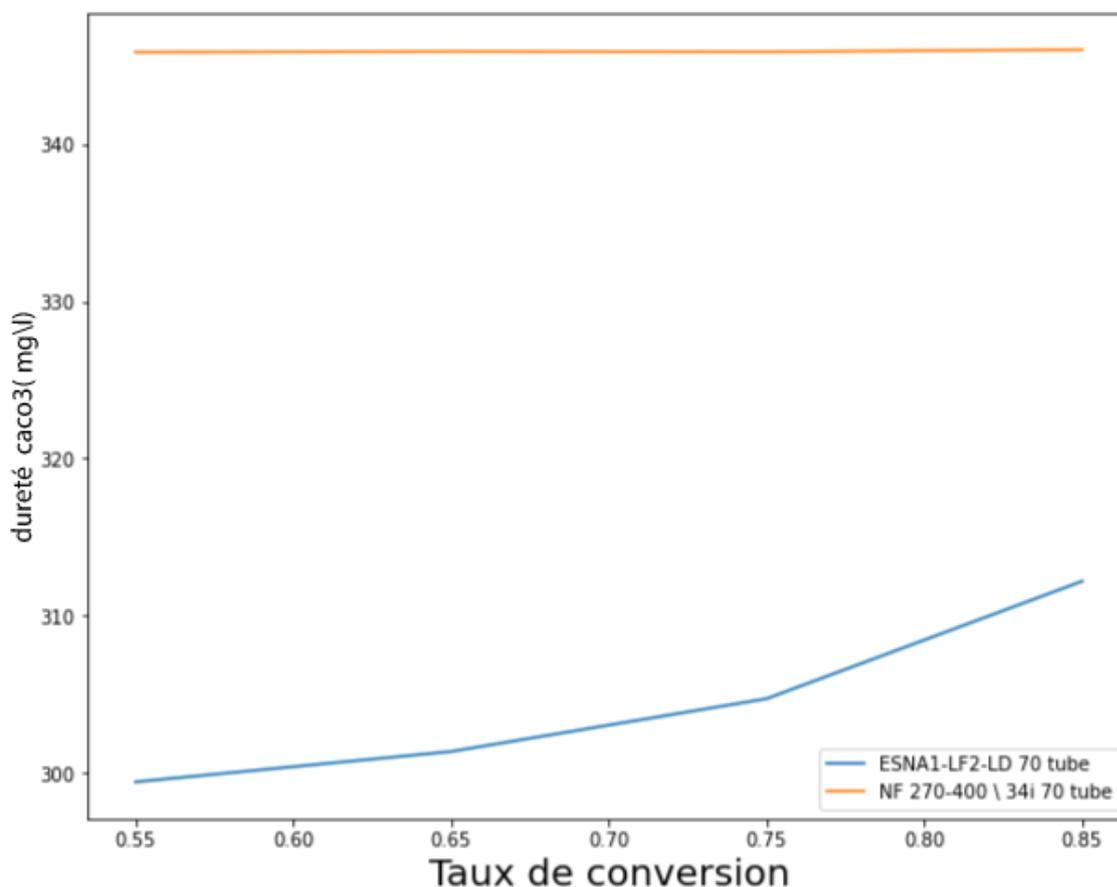


Figure III.10 : l'évolution de la concentration en dureté total sous différents taux de conversion, par des deux membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400/34i avec 2 étages et 70 tubes avec recyclage.

III.2.3.5. Réduction la concentration de TDS

La figure III.11 montre l'évolution de la concentration TDS avec différents taux de conversion par des deux membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400/34i. Notez que lorsque

le taux de conversion augmente, la concentration en TDS de la membrane ESNA1-LF2-LD augmente, mais pour la membrane NF270-400/34i reste stable.

Les concentrations TDS des deux membranes avec des taux de conversion différents sont dans situé dans domaine des normes algérien elle ne dépasse pasLes résultats montrent que la réduction TDS de la membrane ESNA1-LF2-LD est plus efficace que NF270-400/34i, par ce que la concentration donnée par ESNA1-LF2-LD est inférieure à NF270-400/34i.

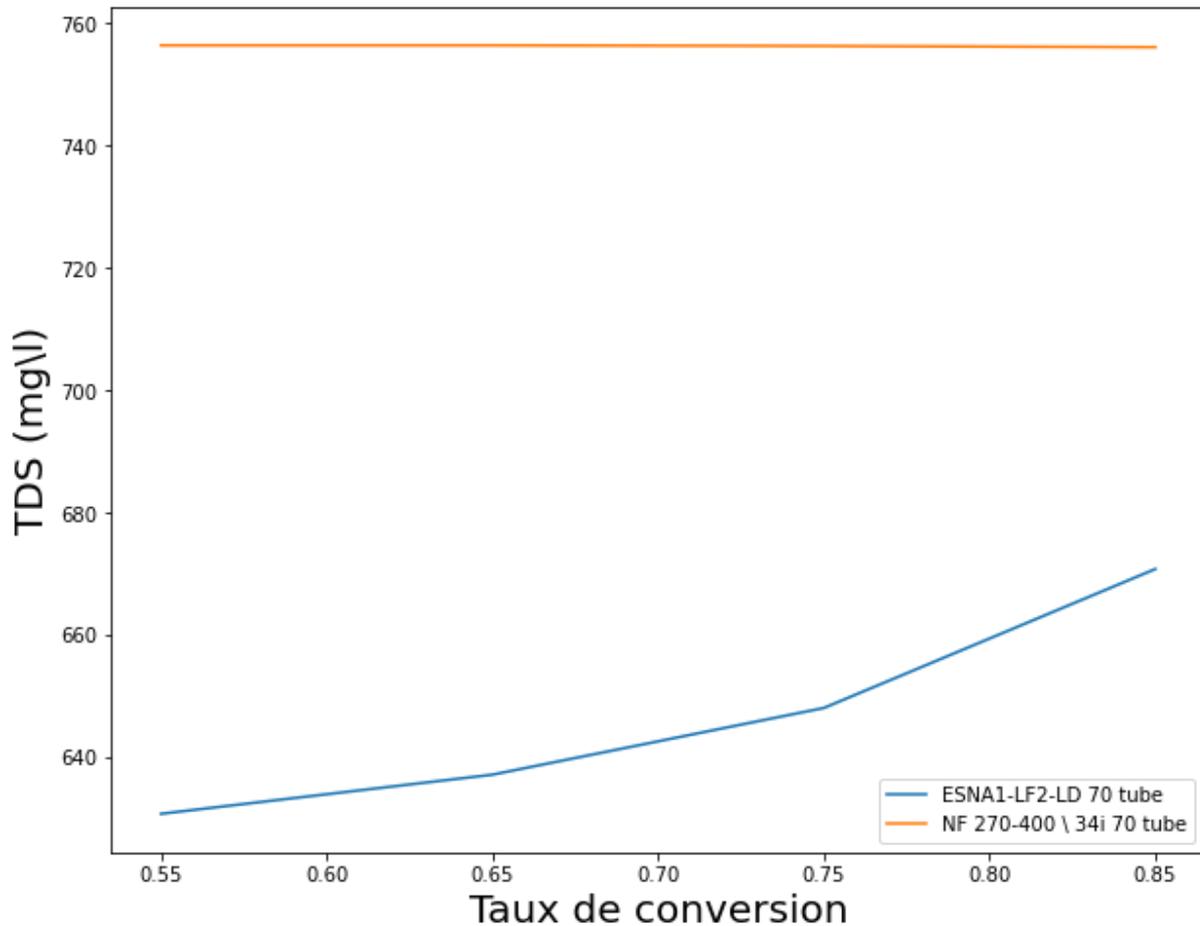


Figure III.11 : l'évolution de la concentration TDS avec différents taux de conversion par des deux membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400/34i avec 2 étages et 70 tubes avec recyclage.

III.2.3.6. Energie spécifique

La figure III.12 représente la variation d'énergie spécifique avec différent taux de conversion. On remarque que pour les deux membranes avec augmentation de taux de conversion énergie spécifique diminue. La consommation énergétique de la membrane ESNA1-LF2-LD est très élevée par rapport membrane de NF270-400/34i, presque doublé.

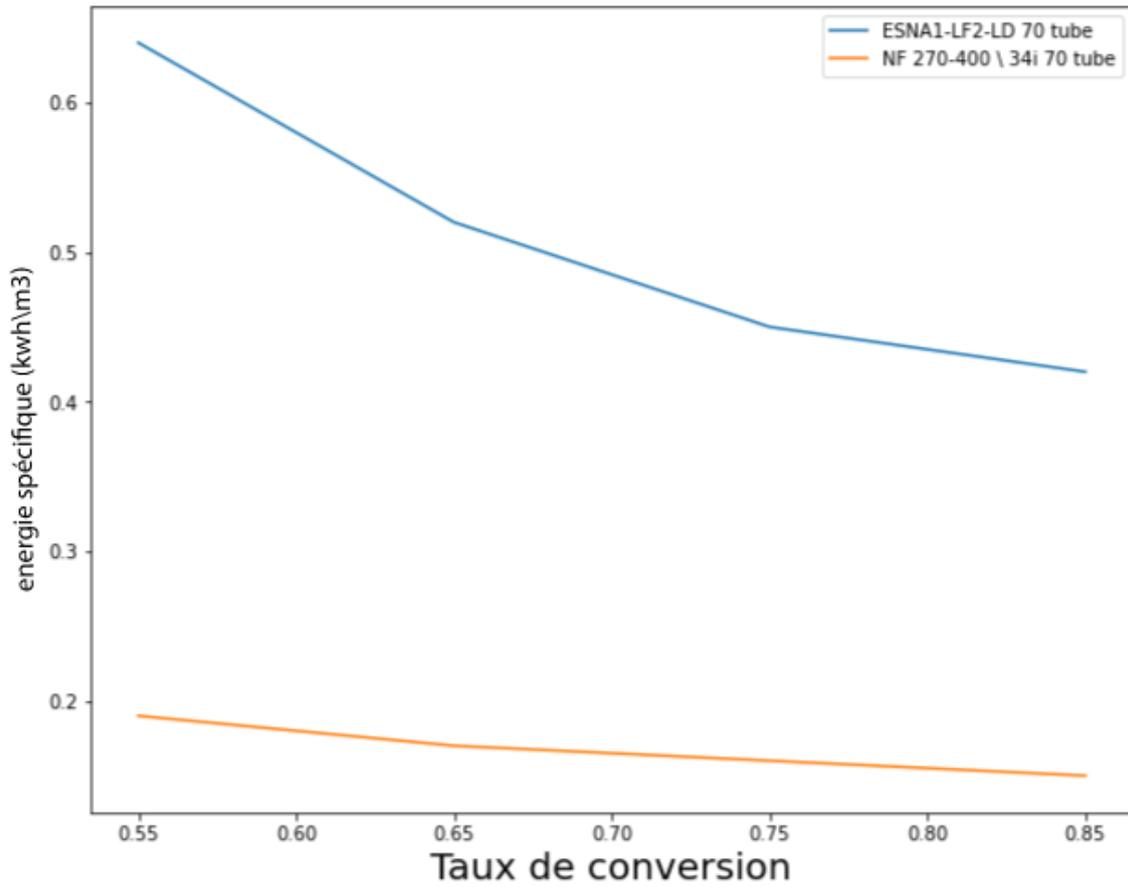


Figure III.12 : la variation d'énergie spécifique avec différent taux de conversion par des deux membranes ESNA1-LF2-LD et NF270-400/34i avec 2 étages et 70 tubes avec recyclage.

III.2.4. comparaison des résultats

Tableur III.5 : les caractéristiques de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec 3 étages et 70 tubes de pression sans recyclage et TR=0.85

Les paramètres	les membranes	
	NF270-400/34i	ESNA1-LF2-LD
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	223,6	244,37
Dureté en CaCO ₃ (mg/l)	422,76	363,57
TDS (mg/l)	749,4	644,92
Energie spécifique (KWh/m ³)	0,12	0,28

Tableur III.6 : les caractéristiques de la membrane NF270-400/34i et de la membrane ESNA1-LF2-LD avec deux étages et 70 tubes de pression avec recyclage et TR=0.85

Les paramètres	les membranes	
	NF270-400/34i	ESNA1-LF2-LD
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	244,8	249,87
Dureté en CaCO ₃ (mg/l)	347,99	312,21
TDS (mg/l)	756,1	670,83
Energie spécifique (KWh/m ³)	0,15	0,42

D'après les caractéristique de permet, énergie spécifique consignées dans les tableaux III.5 et III.6 la membrane NF270-400/34i (dow) présentent meilleur performance avec une configuration trois étage avec 70 tubes sans recyclage reste la solution optimal de cette simulation.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERAL

L'utilisation de la technique nanofiltration pour la potabilisation des eaux montre son efficacité pour la réduction des ions divalents et dans une certaine mesure certains ions monovalents présents dans l'eau de barrage TICHY-HAF. Il s'agit d'une vraie barrière sélective par rapport à l'ensemble des constituants des eaux de barrage de TICHY HAF et constitue une très bonne solution pour le traitement des eaux de barrage ayant une forte concentration en sulfates et en dureté totale.

L'étude comparative des performances des membranes de nanofiltration ESNA1-LF2-LD et NF270-400/34i sur la filtration de l'eau brute par rapport, énergie spécifique, la concentration des sulfates, la dureté, TDS (total dissolved solide) avec différentes configurations. Les différentes simulations en faisant différents paramètres à savoir le design, le type de membranes les conditions d'écoulement, les taux de conversion ont montré qu'il est possible à travers une simulation de choisir une solution optimale. En effet ; La membrane NF270-400/34i (dow) présente de meilleures performances avec une configuration trois étage, 70 tubes sans recyclage avec une énergie spécifique du système moindre.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Etude expérimentale de la coagulation-floculation par le sulfate ferrique et le chlorure ferrique des matières en suspension .Mémoire d'ingénieur d'états en géologie ; Département des sciences de la terre et de l'univers. Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre et de l'univers ; Université AbouBekrBelkaïd, Tlemcen, Juin 2011.

[2] Document de Ministère chargé de la santé – ARS – SISE Eaux ; en France. Février 2016 - Centre d'information sur l'eau Crédit photo : Thinkstock (page de couverture) - Illustrations : Obea Communication.

[3] Hanane, D. A. C. H. (2008). COMPARAISON DES OPÉRATIONS DE NANOFILTRATION ET D'OSMOSE INVERSE POUR LE DESSALEMENT SELECTIF DES EAUX SAUMATRES: DE L'ÉCHELLE DU LABORATOIRE AU PILOTE INDUSTRIEL (Doctoral dissertation, Université d'Angers, France).

[4] Cherif, L. (2012). L'influence de la coagulation-floculation et décantation sur le pré-traitement des eaux saumâtres (Doctoral dissertation).

[5] Document d'aide technique pour les normes, directives et objectifs associés à la qualité de l'eau potable en Ontario Juin 2003 Révisé en juin 2006 PIBS 4449f01 .

[6] Rodier, J., & Legube, B. (2009). L'analyse de l'eau. Dunod.

[7] MOKEDDEM, K., & OUDDANE, S. (2005). Qualité Physico-chimique Et Bactériologique De L'eau De Source Sidi Yaakoub (Mostaganem). Mémoire d'ingénieur institut de biologie– Mascara, 18-22.

[8] Belhocine, D., Belkacemi, H., & Azzi, K. (2016). Etude et contrôle physico-chimiques des mélanges d'eaux brutes du barrage de Tichy-haf et du puit de forage d'Ibourassen (Oued Ghir) pour la production de l'eau ultra-pure (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane Mira-Bejaia).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[9] G.LEYRAL, C. RONNEFOY, F. GUILLET. Microbiologie et qualité des industries agroalimentaire, Paris, 2002, p 245.

[10] Kettab A., 1992 : Traitement des eaux (les eaux potables); Office des publications universitaires (OPU), Alger.

[11] Bernard Legube ; PRODUCTION D'EAU POTABLE Filières et procédés de traitement ©Dunod , 2015.

[12] MEMOIRE TECHNIQUE DE LA STATION DE TRAITEMENT DE TICHY HAF.

[13] Jestin, E. (2006). La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires. AESN Rivières de Basse-Normandie-Agence de l'Eau Seine-Normandie Direction Territoriale et Maritime des Rivières de Basse-Normandie-Hérouville saint Clair.

[14] Cardot G., 2005 : Génie de l'environnement ; Les traitements de l'eau Procédés physico-chimiques et biologiques cours et problèmes résolus, Edition Ellipse, février 2005.

[15] Desjardins C., 1999 : Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée (actiflo) à l'aide d'une procédure modifiée de jar test, Mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées, Ecole polytechnique de Montréal, Canada.

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

[17] Brahmi Z. et BenaissaN., 2010 : Influence de la coagulation floculation et décantation sur la qualité des eaux épurées de la station de Ain El Houtz ; Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique ; Département d'Hydraulique, Faculté des sciences de l'Ingénieur, Université Abou Bekr Belkaid,Tlemcen.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[18] Lakhdari B., 2011 : Effet de la coagulation floculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain El Houtz .Mémoire de magister en Chimie Inorganique et Environnement ; Département de Chimie ; Faculté des Sciences, Université AbouBekrBelkaïd, Tlemcen, Décembre 2011.

[19] RAPPORT SUR LA QUALITE D'EAU BRUTE DU BARRAGE DE TICHY-HAF.

[20] Desjardins R., 1997 : Traitement des eaux ; Edition de l'école polytechnique de Montréal, 2^{ème} édition revue et améliorée.

[21] Hocine, T. Y. (2019). Utilisation de la Goethite et du Feds Path pour optimiser l'élimination des phosphates des eaux naturelles par coagulation floculation.

[22] EZZIANE, S. (2007). TRAITEMENT DES EAUX DE REJETS DE L'UNITE CERAMIT (Doctoral dissertation, Université de Chlef-Hassiba Benbouali).

[23] Hadjer, G., & Ilham, S. (2020). Utilisation des bio-coagulants en traitement des eaux usées textiles (Doctoral dissertation).

[24] Colin L et al., 2008 :Évaluation d'un procédé de coagulation-floculation au chitosane pour l'enlèvement du phosphore dans les effluents piscicoles. Université du Québec; Ecole de technologie supérieure.

[25] Mokhtari A. et Dir B., 2006 : Analyse physico-chimique et bactériologique des eaux potables « groupement urbain de Tlemcen » ; Mémoire pour l'obtention du diplôme DEUA en Hydraulique, Département d'Hydraulique, Faculté des sciences de l'Ingénieur, Université Abou BekrBelkaid, Tlemcen.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[26] JESTIN E., La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires, Agence de l'eau seine-Normandie, Direction des bocages Normands 1, rue de la pompe ;(Jestin.emmanuel@aesn.fr).

[27] RIOS, G. M. (2012). Introduction aux enjeux des procédés membranaires.

[28] J.-C. Remigy et S. Desclaux, « Filtration membranaire (OI, NF, UF) - Présentation des membranes et modules », Technologie de l'eau W4090. p. 1-21, 2007.

[29] P. Aptel et C. A. Buckley, « Categories of membrane operations », in Treatment membrane progress, New York: Mc Graw-Hill, 1996.

[30] Bikai, J. (2015). Etude l'évolution des propriétés de surface d'un matériau minéral à porosité contrôlée lors de sa mise en oeuvre dans des tests d'ultrafiltration et de nanofiltration (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse).

[31] REMIZE P., (2006). Etude Des Rétro Lavages Assistés Par L'air Et Contrôle Du Colmatage Résiduel. Application A La Production D'eau Potable En Filtration Frontale. Génie De Procédés Industriels, Insa De Toulouse.

[32] Bannoud, A. H. (2001). Elimination de la dureté et des sulfates contenus dans les eaux par nanofiltration. Desalination, 137(1-3), 133-139.

[33] DU DIPLOME, V. D. L. O. TRAITEMENT D'UNE EAU DE SURFACE PAR ULTRAFILTRATION: ETUDE DE Prefaisabilite PAR LES ANALYSEs DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES. CAS DE LA JIRAMA FARALAZA.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[34] American Water Works Association (AWWA), (1992). Committee report: Membrane Processes in Potable Water Treatment. Journal of the American Water Works Association. 84(1):59-67.

[35] MOHAMED, (2014). Assemblage et séparation de polyélectrolytes pour le traitement d'eaux contaminées par des cations métalliques. Génie chimique. Université de Franche-Comté.

[36] AIMAR P. et al, (2010b). Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) - Aspects théoriques : perméabilité et sélectivité, référence J2790. Techniques de l'ingénieur.

[37] HERMANS P. et al, (1936). Principles of the mathematical treatment of constant-pressure filtration. Journal of Society of Chemical Industry, 55T, 1–11.

[38] <http://www.septiemecontinent.com/pedagogie/lesson/eau-terre-origine-repartition>

[39] JACQUES BIKAI, (2015). Etude L'évolution Des Propriétés De Surface D'un Matériau Minéral A Porosité Contrôlée Lors De Sa Mise En Oeuvre Dans Des Tests D'ultrafiltration Et De Nanofiltration. Génie Chimique. Université De Haute Alsace – Mulhouse.

[40] United States Environmental Protection Agency, 2001.

[41] Bannoud, A. H. (2001). Elimination de la dureté et des sulfates contenus dans les eaux par nanofiltration. Desalination, 137(1-3), 133-139.

[42] BOERLAGE. et al, (2003). The MFI-UF as a water quality test and monitor. Journal of Membrane Science, 211, Issue 2, 271–289.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [43] MALLEVIALLE J. et al, (1996). The Emergence Of Membranes In Water Andwaste Water Treatment, In: Water Treatment Membrane Process, Chapitre 1, Mcgraw-Hill.
- [44] https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Tichy-haf suivie le 16/16/2021
- [45] <https://membranes.com/solutions/software-imsdesign>.
- [46] <https://www.dupont.com/water/resources/design-software.html>.
- [47] <https://www.lri.fr/~hivert/COURS/Methodo/python.pdf>
- [48] Introduction-aux-graphiques-en-python-avec-matplotlib-pyplot.pdf
- [49] Bannoud, A. H., & Darwich, Y. (2007). Elimination des ions fluorures et manganèses contenus dans les eaux par nanofiltration. Desalination, 206(1-3), 449-456.

ANNEXES

ANNEXES

Annexes 1 : Fiche technique de la membrane HYDRANAUTICS ENA1-LF-LD.



ESNA1-LF2-LD

Specified Performance*

Permeate Flow:	12,000 gpd (45.4 m ³ /d)
CaCl ₂ Rejection:	91%
CaCl ₂ Rejection (Minimum/Maximum):	86%/96%

* Expected calcium rejection for a typical 500 ppm well water is 93% at 13 gfd operating flux and 25°C.

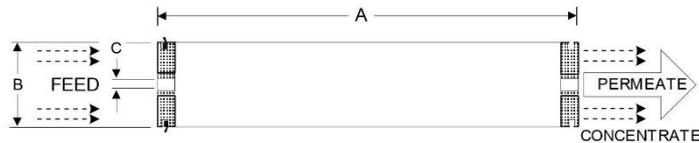
Test Conditions:	500 ppm CaCl ₂ solution
	75 psig (0.52 MPa) Applied Pressure
	77 °F (25 °C) Operating Temperature
	15% Permeate Recovery
	6.5 - 7.0 pH Range

*The Specified Performance is based on data taken after a minimum of 10 minutes of operation. Actual testing of elements may be done at conditions which vary from these exact values; in which case, the performance is normalized back to these standard conditions. Permeate flow for individual elements may vary -20 / +25 percent from the value specified.

General Product Description**

Configuration:	Low Fouling Spiral Wound
Membrane Polymer:	Composite Polyamide
Membrane Active Area**:	400 ft ² (37.2 m ²)
Feed Spacer:	34 mil (0.86 mm)

Packaging: All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and O-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.



Element Details**

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

**Values listed are indicative, not specified. For more detailed specifications, see our Technical Service Bulletin documents or contact Hydranautics Technical Department.

Product Use and Restrictions^

Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.14 MPa)
Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 ppm
Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
pH Range, Continuous (Cleaning):	2-10 (1-12 @25 for 30 minutes)
Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
Maximum Feed Flow:	85 gpm (19.3 m ³ /h)
Minimum Brine Flow:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
Maximum Pressure Drop for Each Element:	15 psi (0.10 MPa)

^ The limitations shown here are for general use. For specified projects, operation at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more details.

Disclaimer: The information and data are presented in good faith and in lieu of all warranties. All express or implied warranties, including the warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, are hereby disclaimed and excluded. Conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 1/17/2019

Hydranautics Corporate office

401 Jones Road, Oceanside, CA 92058, USA Toll Free: +1-800-CPA-PURE Tel: +1-760-901-2500 Fax: +1-760-901-2578
Web: www.membranes.com Email: hy-info@nitto.com

ANNEXES

Annexes 1 : Fiche technique de la membrane DOW NF270-400/34i



Product Data Sheet

FilmTec™ NF270-400/34i Element

Description

Ideal for: utility managers and operators dealing with surface and groundwater and seeking a technology that removes a high percentage of total organic carbon (TOC) and trihalomethan (THM) precursors while having a medium to high salt passage and medium hardness passage.



The FilmTec™ NF270-400/34i Element:

- Provides organic removal with partial softening in order to maintain a minimum level of hardness for organoleptic properties and preservation of distribution networks
- Delivers high productivity, cleanability and low energy consumption due to its high active area and wide cleaning pH range (1-12) tolerance
- Includes iLEC™ interlocking end caps, reducing system operating costs and the risk of o-ring leaks that can cause poor water quality

Product Type

Spiral-wound element with polypiperazine thin-film composite membrane

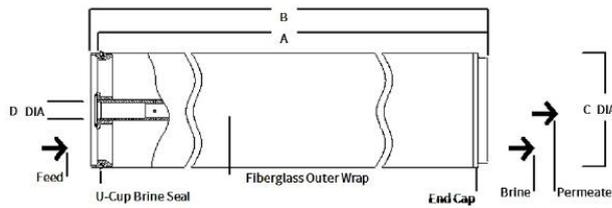
Typical Properties

FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer Thickness (mil)	Permeate Flow Rate		Typical Stabilized Salt Rejection (%)	Minimum Salt Rejection (%)
	(ft ²)	(m ²)		(GPD)	(m ³ /d)		
NF270-400/34i	400	37	34-LDP	12,500	47	>97.0	97.0

1. Permeate flow and salt passage based on the following test conditions: 2,000 mg/l MgSO₄, 70 psi (4.8 bar), 77 °F (25 °C) and 15% recovery.
2. Flow rates for individual elements may vary but will be no more than ± 15%.
3. Stabilized salt rejection is generally achieved within 24-48 hours of continuous use; depending upon feedwater characteristics and operating conditions.
4. Sales specifications may vary as design revisions take place.
5. Active area guaranteed ± 3%. Active area as stated by DuPont Water Solutions is not comparable to nominal membrane area often stated by some manufacturers.

ANNEXES

Element Dimensions



Dimensions – inches (mm)							1 inch = 25.4 mm	
	A		B		C		D	
FilmTec™ Element	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)
NF270-400/34i	40.0	1,016	40.5	1,029	7.9	201	1.125 ID	29 ID

1. Refer to [FilmTec™ Design Guidelines for multiple-element systems of 8-inch elements](#) (Form No. 45-D01695-en).
2. Element to fit nominal 8-inch (203-mm) I.D. pressure vessel.
3. Individual elements with iLEC™ endcaps measure 40.5 inches (1,029 mm) in length (B). The net length (A) of the elements when connected is 40.0 inches (1,016 mm).

Operating and Cleaning Limits

Maximum Operating Temperature ^a	113°F (45°C)
Maximum Operating Pressure	600 psig (41 bar)
Maximum Element Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
pH Range	
Continuous Operation ^a	3 - 10
Short-Term Cleaning (30 min.) ^b	1 - 12
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance ^c	<0.1 ppm

- a. Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).
- b. Refer to [Cleaning Guidelines](#) (Form No. 45-D01696-en).
- c. Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, DuPont Water Solutions recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to [Dechlorinating Feedwater](#) (Form No. 45-D01569-en) for more information.

Additional Important Information

Before use or storage, review these additional resources for important information:

- [Usage Guidelines for FilmTec™ 8" Elements](#) (Form No. 45-D01706-en)
- [Start-Up Sequence](#) (Form No. 45-D01609-en)

Product Stewardship

DuPont has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our product stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our product stewardship program rests with each and every individual involved with DuPont products—from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

ANNEXES

Customer Notice

DuPont strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of DuPont products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that DuPont products are not used in ways for which they are not intended or tested. DuPont personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. DuPont product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of DuPont products. Current safety data sheets are available from DuPont.

Please be aware of the following:

- The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.

Regulatory Note

This product may be subject to drinking water application restrictions in some countries; please check the application status before use and sale.

Have a question? Contact us at:

www.dupont.com/water/contact-us

All information set forth herein is for informational purposes only. This information is general information and may differ from that based on actual conditions. Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where DuPont is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Please note that physical properties may vary depending on certain conditions and while operating conditions stated in this document are intended to lengthen product lifespan and/or improve product performance, it will ultimately depend on actual circumstances and is in no event a guarantee of achieving any specific results. DuPont assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "DuPont" or the "Company" mean the DuPont legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED. No freedom from infringement of any patent or trademark owned by DuPont or others is to be inferred.

©2021 DuPont. DuPont™, the DuPont Oval Logo, and all trademarks and service marks denoted with ™, SM or © are owned by affiliates of DuPont de Nemours Inc., unless otherwise noted.



ANNEXES

Annexes 3 : La simulation proposée par AMENHYDE.

Logiciel de dimensionnement pour les solutions membranaires intégrées		Nitro HYDRANAUTICS Water Energy Company												
Créé le : 14/03/2021 10:38:45														
Mélange perméat, Contrepression perméat (Variable)														
Nom du projet	AKBOU, TICHY HAF	flux / train perméat	10000,0 m3/d											
	OUGOUGHILHA	le flux total du produit	220000,00 m3/d											
Calculé par	FIED	Number of trains	10											
Débit Pompe HP	490,14 m3/h	écoulement de l'eau brute / train	23764,7 m3/d											
Pression alimentation	10,0 bar	Taux de conversion perméat	85,00 %											
Température alimentation	10,0 °C(50,0°F)	Débit de mélange	22000,0 m3/d											
pH eau alimentation	7,90	Age élément	3,0 années											
Dosage produit chimique,mg/l, -	None	Déclin du flux %, par an	5,0											
Energie spécifique	0,41 kwh/m3	Coefficient de colmatage	0,86											
NDP pass	5,4 bar	Perte de flux par an,%	7,0 %											
Flux moyen	26,6 lmh	Perte de charge canalisation inter-étage	0,207 bar											
		Type alimentation	Eau saumâtre de forage faible colmatage											
page : 1/3														
Pass - Perm.	Débit / Tube	Flux	DP	Flux	Bêta	pression par étage	Perm.	Elément	Elément	PV# x				
Etage	Débit Alimentation	Conc		max		Perm.	Boost	Conc	TDS	Type	Quantité	Elem #		
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh	bar	bar	mg/l					
1-1	259,2	12,3	5,8	29	1,1	32,9	1,15	3	0	8,9	76,8	ESNA1-LF2-LD	240	40 x 6M
1-2	109,9	11,5	6,1	24,6	1	28,5	1,12	2	0	7,7	174,1	ESNA1-LF2-LD	120	20 x 6M
1-3	47,9	12,1	7,3	21,6	1,2	26,1	1,1	0,4	0	6,3	340,1	ESNA1-LF2-LD	60	10 x 6M
Ion (mg/l)	Eau brute	Eau alimentation	imprégner l'eau	Concentrat-1	Concentrat-2	Concentrat-3	Blended Product							
Dureté, CaCO3	527,42	527,42	36,723	1096,0	2046,6	3322,3	304,37							
Ca	129,00	129,00	10,738	267,0	496,3	802,6	75,24							
Mg	50,00	50,00	2,410	104,6	196,6	321,1	28,37							
Na	114,00	114,00	25,780	225,0	398,4	616,6	73,90							
K	5,00	5,00	1,695	9,5	16,0	23,8	3,50							
NH4	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00							
Ba	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00							
Sr	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00							
H	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00							
CO3	1,20	1,20	0,024	5,6	21,2	58,8	0,66							
HCO3	260,00	260,00	42,921	522,2	941,7	1471,7	161,57							
SO4	430,00	430,00	22,688	898,2	1686,1	2749,9	244,86							
Cl	80,00	80,00	24,215	153,5	264,0	397,8	54,64							
F	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00							
NO3	7,00	7,00	2,292	13,3	22,6	33,8	4,86							
PO4	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00							
OH	0,00	0,00	0,001	0,0	0,0	0,0	0,00							
SiO2	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00							
B	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,00							
CO2	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94							
NH3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
TDS	1076,20	1076,20	132,76	2198,80	4042,93	6476,14	647,61							
pH	7,90	7,90	7,16	8,16	8,42	8,59	7,71							
Saturations	Eau brute	Eau alimentation	Concentrat	Limites										
CaSO4 / ksp * 100, %	14	14	147	400										
SrSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	1200										
BaSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	10000										
SiO2 saturation, %	0	0	0	140										
CaF2 / ksp * 100, %	0	0	0	50000										
Ca3 (PO4) 2 indice de saturation	0,0	0,0	0,0	2,4										
CCPP, mg/l	36,74	36,74	843,24	850										
Langelier indice de saturation	0,45	0,45	2,61	2,8										
Force ionique	0,03	0,03	0,16											
Pression osmotique, bar	0,5	0,5	2,7											
<p>Les calculs de performance du produit sont basés sur la performance nominale de l'élément lorsqu'il est utilisé avec une eau d'alimentation de qualité acceptable. Les résultats présentés sur les impressions produites par ce programme sont des estimations de la performance du produit. Aucune garantie de produit ou performance de système n'est exprimée ou suggérée à moins qu'elle ne soit</p>														

ANNEXES

Logiciel de dimensionnement pour les solutions membranaires intégrées



Créé le : 14/03/2021 10:38:45

Mélange perméat, Contrepression perméat (Variable)

Nom du projet	AKBOU, TICHY HAF	flux / train perméat	10000.0 m3/d
Calculé par	OUGOUGHILHA	le flux total du produit	220000.00 m3/d
Débit Pompe HP	FIED	Number of trains	10
Pression alimentation	10,0 bar	écoulement de l'eau brute / train	23764.7 m3/d
Température alimentation	10,0 °C(50,0°F)	Taux de conversion perméat	85,00 %
pH eau alimentation	7,90	Débit de mélange	22000.0 m3/d
Dosage produit chimique,mg/l, -	None	Age élément	3,0 années
Energie spécifique	0,41 kwh/m3	Déclin du flux %, par an	5,0
NDP pass	5,4 bar	Coefficient de colmatage	0,86
Flux moyen	26,6 l/mh	Perte de flux par an,%	7,0 %
		Perte de charge canalisation inter-étage	0,207 bar

page : 2/3

Pass -	Perm.	Débit / Tube	Flux	DP	Flux	Bêta	press	Type	Eau saumâtre de forage faible colmatage	Perm.	Elément	Elément	PV# x	
Etage	Débit	Alimentation	Conc	lmh	bar	lmh	bar	Boost	Conc	TDS	Type	Quantité	Elem #	
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh	bar	bar	bar	mg/l				
1-1	259,2	12,3	5,8	29	1,1	32,9	1,15	3	0	8,9	76,8	ESNA1-LF2-LD	240	40 x 6M
1-2	109,9	11,5	6,1	24,6	1	28,5	1,12	2	0	7,7	174,1	ESNA1-LF2-LD	120	20 x 6M
1-3	47,9	12,1	7,3	21,6	1,2	26,1	1,1	0,4	0	6,3	340,1	ESNA1-LF2-LD	60	10 x 6M

Pass -	Elément	Alimentation	Pression	Conc	NDP	imprégner l'eau	imprégner l'eau	Bêta	Perméat (Cumul des étages)				
Etage	no.	Pression	Perte	Osmo.	bar	Débit	Flux		TDS	Ca	Mg	Na	Cl
		bar	bar	bar	bar	m3/h	lmh						
1-1	1	10	0,26	0,5	6,5	1,2	32,9	1,1	50,9	3,936	0,87	10,08	9,834
1-1	2	9,7	0,22	0,6	6,1	1,1	30,7	1,1	55,3	4,286	0,949	10,941	10,653
1-1	3	9,5	0,19	0,6	5,8	1,1	29,5	1,11	59,8	4,647	1,029	11,816	11,477
1-1	4	9,3	0,16	0,7	5,6	1	28,2	1,12	64,7	5,048	1,119	12,776	12,376
1-1	5	9,1	0,13	0,8	5,3	1	27	1,13	70,3	5,504	1,222	13,857	13,381
1-1	6	9	0,11	1	5,1	1	26	1,15	76,8	6,036	1,342	15,101	14,528
1-2	1	8,7	0,24	1	5,6	1,1	28,5	1,09	117,3	9,368	2,094	22,916	21,754
1-2	2	8,4	0,21	1,1	5,3	1	26,8	1,09	126,4	10,115	2,262	24,659	23,36
1-2	3	8,2	0,18	1,3	5	0,9	25,3	1,1	136,4	10,946	2,45	26,58	25,122
1-2	4	8,1	0,15	1,4	4,7	0,9	23,8	1,1	147,5	11,876	2,661	28,712	27,066
1-2	5	7,9	0,13	1,6	4,5	0,8	22,4	1,11	160	12,923	2,899	31,092	29,224
1-2	6	7,8	0,11	1,7	4,2	0,8	20,9	1,12	174,1	14,112	3,17	33,769	31,638
1-3	1	7,5	0,26	1,9	5,2	1	26,1	1,08	229,1	18,878	4,263	44,087	40,706
1-3	2	7,2	0,23	2	4,9	0,9	24,1	1,1	247,4	20,432	4,617	47,575	43,848
1-3	3	7	0,2	2,2	4,5	0,8	22,2	1,1	267,6	22,142	5,007	51,386	47,266
1-3	4	6,8	0,18	2,4	4,1	0,8	20,5	1,1	289,6	24,021	5,437	55,547	50,983
1-3	5	6,6	0,16	2,6	3,8	0,7	18,7	1,1	313,7	26,089	5,91	60,094	55,028
1-3	6	6,4	0,14	2,7	3,5	0,6	17	1,08	340,1	28,364	6,431	65,06	59,426

ANNEXES

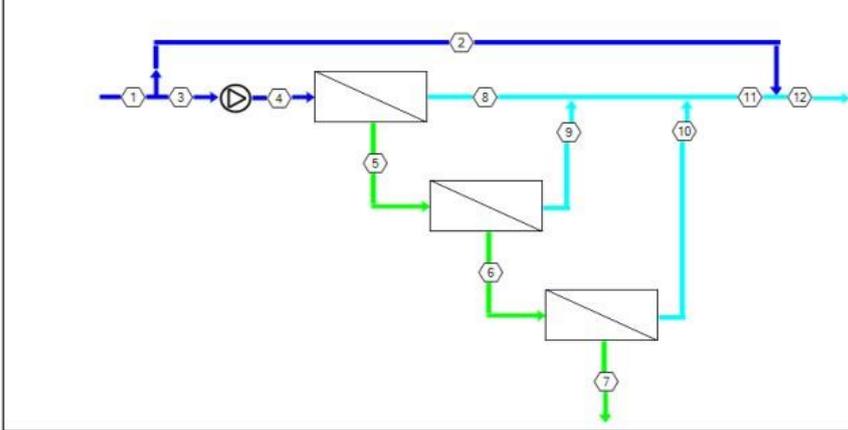
Logiciel de dimensionnement pour les solutions membranaires intégrées
Créé le : 14/03/2021 10:38:45



Mélange perméat, Contrepression perméat (Variable)

Nom du projet : AKBOU, TICHY HAF
Température : 10,0 °C

page : 3/3
Age élément, P1 : 3,0 années



Stream No.	Débit (m ³ /h)	Pression (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	990	0	1076		1878
2	500	0	1076		1878
3	490	0	1076		1878
4	490	9,96	1076		1878
5	231	8,89	2199		3545
6	121	7,66	4043		6166
7	73,2	6,31	6476		9527
8	259	3,00	76,8		131
9	110	2,00	174		296
10	47,9	0,400	340		578
11	417	0,400	133		226
12	917	0,400	647		1204

Les calculs de performance du produit sont basés sur la performance nominale de l'élément lorsqu'il est utilisé avec une eau d'alimentation de qualité acceptable. Les résultats présentés sur les impressions produites par ce programme sont des estimations de la performance du produit. Aucune garantie de produit ou performance de système n'est exprimée ou suggérée à moins qu'elle ne soit